

Estudo e desenvolvimento de uma solução de monitorização estrutural em túneis baseada na tecnologia de redes de Bragg em fibra ótica

RUI VASCO RIBEIRO GASPAR

Outubro de 2014

Aos meus pais

RESUMO

Ao longo dos últimos anos, vários esforços e estudos foram feitos com o objetivo de colocar a fibra ótica no mercado, como um sistema preferencial de monitorização das mais diversas obras de Engenharia. Os sensores baseados na tecnologia em fibra ótica apresentam vantagens reconhecidas pelos mais diversos especialistas, sendo atualmente reconhecida como uma das soluções mais eficazes.

Na engenharia Civil, a monitorização das grandes obras tem ganho uma importância crescente. Neste contexto, a monitorização de convergências em túneis visa o controlo da respectiva integridade estrutural ao longo da construção e a exploração da obra.

Atualmente a solução de monitorização estrutural de túneis utilizada pela FiberSensing é uma solução desenhada em conjunto com a EPOS e o Cegeo (IST), baseada em sensores de Bragg em Fibra Ótica: o SysTunnel. O objetivo do estudo de uma solução alternativa encontra-se no facto do SysTunnel apresentar algumas debilidades no algoritmo de cálculo, sendo para o seu cálculo necessário a introdução de um parâmetro relacionado com o solo envolvente do túnel, facto que introduz incertezas no cálculo das convergências.

O presente relatório tem como finalidade documentar o estágio curricular realizado na FiberSensing, entre 01/02/2014 a 31/07/2014. Este estágio teve como objetivo o desenvolvimento de uma solução alternativa de monitorização estrutural baseada na tecnologia das redes de Bragg para a monitorização das convergências em túneis.

ABSTRACT

Over the past years, several studies and efforts were made with the goal of getting fiber optic sensing in the market as the preferred monitoring system for various engineering works. Fiber optic sensor technology has recognized advantages pointed out by several experts and is currently recognized as one of the most effective solutions.

In Civil engineering, monitoring of major projects has gained increasing importance. In this context the monitoring of convergence in tunnels intended to control its structural integrity during the construction and the exploration of the infrastructure.

The current solution for structural monitoring of tunnels used by FiberSensing is a complete solution designed in conjunction with EPOS and the Cegeo (IST), based on Fiber Bragg Grating: the SysTunnel. The purpose in pursuing an alternative lies in the fact that at the moment the system shows some “weakness” in the calculation of the algorithm, which need the introduction of a calculation related to the surrounding soil tunnel parameter, which brings significant errors in calculation of convergences.

This report aims to document the internship held in FiberSensing between 02/01/2014 to 07/31/2014. This stage aimed to develop an alternative solution based on structural monitoring technology of FBGs for monitoring convergence in tunnels.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus pais por me proporcionarem a oportunidade de realizar tanto a licenciatura como o mestrado de Engenharia Civil, e por todo o apoio durante todos estes anos para as suas conclusões.

Ao Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto e à FiberSensing pela oportunidade de realizar este estágio Curricular. Ao Laboratório de Estruturas do DEC por ter dispensado o comparador digital e o respetivo suporte para auxílio de testes.

À Engenheira Cristina Barbosa e ao Professor Carlos Rodrigues, meus orientadores, pela atenção dedicada durante todo o período de estágio e por todos os conhecimentos partilhados.

A todos os meus amigos, e aos meus dois irmãos, pela preciosa companhia e ajuda ao longo do mestrado.

A todas as pessoas que conheci na FiberSensing, pela boa disposição e disponibilidade demonstrada durante todo o estágio.

À minha namorada, Daniela Ribeiro, por todo o apoio, carinho e companhia ao longo de todos os anos.

Índice de Texto

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objectivos	2
1.3	FiberSensing – A Empresa.....	3
1.4	Estrutura do relatório.....	4
2	Estudo de soluções para medição de convergências.....	6
2.1	Introdução	6
2.2	Soluções de monitorização de convergências	8
2.2.1	Cinta extensométrica digital.....	8
2.2.2	Convergenciómetro de haste.....	9
2.2.3	Convergenciómetro de fita.....	10
2.2.4	Sistema de medição ótico 3D.....	11
2.2.5	Basset Convergence System	12
2.2.6	MEMCOT – Método Extensométrico para Monitorizar Convergências em Túneis	15
2.3	SysTunnel.....	16
2.3.1	Descrição Geral.....	16
2.3.2	Sensores utilizados no SysTunnel	18
2.3.3	Instalação.....	20
2.3.4	Modelo matemático.....	21
2.3.5	Testes ao sistema	27
3	Sensores baseados na tecnologia da fibra ótica	28
3.1	Introdução	28
3.2	A fibra ótica	29
3.2.1	Tipos de fibra ótica	32
3.2.2	Características das fibras óticas.....	34
3.2.3	Propriedades da Fibra Ótica	35
3.3	Redes de Bragg.....	37
3.3.1	Princípio de funcionamento das Redes de Bragg	37

3.3.2	Características das redes de Bragg.....	40
3.3.3	Aplicações.....	42
3.3.4	Redes de Bragg como sensores.....	44
3.3.5	Sensibilidade dos sensores.....	45
3.3.5.1	Sensibilidade à Temperatura	45
3.3.5.2	Sensibilidade à deformação mecânica.....	46
3.4	Elementos constituintes de um sistema de monitorização em fibra ótica	47
3.4.1	Sensores e transdutores.....	47
3.4.2	Unidades de leitura (MU – Measurement Unit)	48
3.4.3	Fibra ótica.....	49
3.4.4	Cabo ótico	49
3.4.5	Conexões / Emendas	50
3.4.5.1	Conexão por splice	50
3.4.5.2	Conexão por Conectores	52
3.5	Redes de sensores FBG	54
3.5.1	Rede em forma de estrela	54
3.5.2	Rede em forma de árvore.....	54
4	ShapeSensor - Conceção e Desenvolvimento.....	55
4.1	Introdução	55
4.2	Funcionamento do Sistema de Monitorização.....	56
4.3	Funcionamento do Sensor	57
4.4	Componentes ShapeSensor	59
4.5	Dimensionamento da barra de compósito.....	61
4.5.1	Obtenção da equação de extensões da barra de compósito.....	61
4.5.2	Comparação de valores manuais vs Autodesk Robot Structural Analysis	65
4.6	Escolha da barra de compósito.....	66
4.7	Preparação/Colagem dos FBG nas barras de compósito	68
4.8	Sensibilidade teórica do protótipo	71
5	Testes de calibração do sensor	74
5.1	Introdução	74

5.2	Resultados	76
5.3	Conclusões	76
6	Sistema de medição de convergências em túneis baseado no ShapeSensor.....	78
6.1	Introdução	78
6.1.1	Enquadramento do caso de estudo	78
6.1.2	ShapeSensor na secção do túnel.....	78
6.2	Metodologia de Cálculo	79
6.3	Conclusão	83
7	Considerações Finais.....	84
7.1	Conclusões.....	84
7.2	Sugestões de desenvolvimentos futuros	85
	Bibliografia	87

ANEXOS:

ANEXO 1 – Testes de calibração do sensor

Índice de Figuras

Figura 1 - Grandes convergências no túnel de Mucha em Taiwan (HoeK, 2001)	1
Figura 2 – Exemplo de medição de convergências na secção de um túnel (Sousa, 2001).....	7
Figura 3 – Cinta extensométrica digital (Soil Instruments, 2007).....	8
Figura 4 – Instalação de cintas extensométricas em túneis (Soil Instruments, 2007).	8
Figura 5 – Convergeciómetro de haste (LNEC, 1980).....	9
Figura 6 – Convergeciómetro de fita e respetiva legenda (LNEC, 1984)	10
Figura 7 - Convergeciómetro de fio do LNEC (Sousa, 2001)	10
Figura 8 – Targos de Bireflex, pinos de convergência e assentamento (Wang, 1998).	11
Figura 9 - Exemplo representativo do sistema de Basset	12
Figura 10 - Representação das convergências possíveis de medir com o método de Basset (Basset-system datasheet).....	14
Figura 11 - Instalação do sistema de Basset num túnel de Londres (Soil Instruments, 2007).	14
Figura 12 – Disposição dos sensores sobre a barra metálica inoxidável (FiberSensing, 2013).	17
Figura 13 – Sensor soldável de deformação (FiberSensing, 2013).....	18
Figura 14 – Sensor soldável de temperatura (FiberSensing, 2013)	19
Figura 15 – Flexão de barras inicialmente curvas: a) antes da flexão; b) depois da flexão	21
Figura 16 - Variação do tamanho do arco de pressão em torno dos túneis com o RQD do maciço, segundo o critério de Terzaghi, modificado por Rose (1982) e segundo (Ucar, 2004).....	23
Figura 17 – Procedimento para a medição e cálculo do RQD (FEUP)	25
Figura 18 - Modelos à escala real das secções o túnel do Rossio (SysTunnel Application Note-v2).....	27
Figura 19- Resultados de testes ao sistema.....	27
Figura 20 – Escala real de fibras óticas (Ribeiro, 2009).....	29
Figura 21 - Representação esquemática da estrutura de uma fibra ótica (Rodrigues C. , 2001).....	29
Figura 22 – Imagem representativa da reflexão interna total (Pires, 2013).....	30
Figura 23 – Imagem Representativa da Lei de Snell (Ribeiro, 2009)	31
Figura 24 - Tipos de fibra ótica: a) índice degrau; b) Índice gradual; c) Fibra monomodo	33
Figura 25 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra ótica.....	34
Figura 26 – Fabricação de uma rede de Bragg pelo método da máscara de fase (Araújo, 2000).....	38
Figura 27 - Potência refletida em função do comprimento de onda (Marques, 2008)	39

Figura 28 - Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma rede em Bragg de uma fibra de ótica (Alves, 2007).....	40
Figura 29 - Exemplos de sensores de Bragg utilizados na Engenharia Civil (FiberSensing, 2014)	43
Figura 30 – Sensores de Deformação – “FS6200. FiberSensing”	47
Figura 31 – Exemplo de uma unidade de medida desenvolvida e produzida na FiberSensing – “FS2100 FS2200 • Industrial BraggMETER”	48
Figura 32 – Cabos óticos utilizados pela FiberSensing	49
Figura 33 - Máquina de fusão para união de fibras	50
Figura 34 - Máquina de corte da fibra ótica.....	51
Figura 35 - Exemplo de um Splice realizado por um membro da FiberSensing em obra... 51	
Figura 36 - Conector SC/APC	53
Figura 37 - Conector FC/APC	53
Figura 38 - Adaptador SC/APC.....	53
Figura 39 - Adaptador FC / APC	53
Figura 40 - União de duas fibras por conexão realizada por um membro da FiberSensing 53	
Figura 41 – Exemplo esquemático de uma rede em forma de estrela.....	54
Figura 42 – Exemplo esquemático de uma rede em forma de árvore.....	54
Figura 43 - Exemplo de disposição dos sensores aplicados em uma secção de um túnel ... 56	
Figura 44 - Exemplo de uma deformação em uma secção de um túnel.....	56
Figura 45 – Desenhos do Protótipo ShapeSensor (dimensões em mm)	58
Figura 46 - Representação dos apoios da barra de compósito no ShapeSensor	60
Figura 47 - Protótipo ShapeSensor	60
Figura 48 - Esquema estrutural do ShapeSensor	63
Figura 49 - Momentos na barra de compósito provenientes da rotação.....	63
Figura 50 - Momentos na barra de compósito provenientes do deslocamento.....	63
Figura 51 - Dimensionamento da barra de compósito	65
Figura 52- Esquema de colagem dos FBG na 1ª barra.....	68
Figura 53 - Esquema de colagem dos FBG na 2ª barra.....	68
Figura 54 - Esquema de colagem dos FBG na 3ª barra.....	69
Figura 55- Cola NP - 50 utilizada na colagem dos FBG	69
Figura 56 - Colagem do 1º FBG na barra de 8 cm.....	70
Figura 57 - Forno da <i>memmert</i> utilizado para a secagem da cola	70
Figura 58 - Barra de compósito com 4 cm colocada na assemblagem metálica.....	71
Figura 59 - Valores teóricos da 1ª barra	71
Figura 60 - Valores teóricos da 2ª barra	72
Figura 61 - Valores teóricos da 3ª barra	73
Figura 62 - Fixação do sensor para início de teste de deslocamento	74

Figura 63 - Sensor Shape com barra de 4 cm, barra de compósito livre e sensor de temperatura no interior da câmara térmica.....	75
Figura 64 - Câmara de ciclos térmicos.....	75

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Existe nos dias de hoje uma necessidade crescente em monitorizar em tempo real as grandes obras de Engenharia Civil que cada vez mais realizadas. Sendo a Engenharia Civil uma importante área de impacto social e económico é de elevada importância o estudo e desenvolvimento de tecnologias de monitorização de modo a acompanhar as crescentes exigências.

O presente relatório incide o seu foco na monitorização de convergências nos túneis. A segurança destas obras de arte é imprescindível, no sentido que os acidentes causados por falhas são de valores incalculáveis, como se verifica na Figura 1. Requer-se uma monitorização regular e constante de forma a haver níveis de operacionalidade durante a fase de construção da obra, e de segurança e estabilidade durante a fase de serviço.



Figura 1 - Grandes convergências no túnel de Mucha em Taiwan (HoeK, 2001)

Os sensores de fibra ótica são hoje olhados como uma alternativa mais viável e rentável em termos económicos e de desempenho para a monitorização em tempo real de diversas estruturas. Os seus principais argumentos como a solução mais viável passam por: elevada

sensibilidade, o peso e tamanhos reduzidos, a ausência de emissões e/ou sensibilidade EMI/FMI, a operação segura nos mais diversos cenários, a elevada largura de banda da fibra ótica, entre outros. Entre os vários tipos de sensores de fibra ótica existentes destacam-se as redes de Bragg, as quais apresentam inúmeras vantagens à frente enunciadas e as quais são alvo de estudo ao longo deste relatório.

1.2 Objectivos

No âmbito da colaboração acordada entre o ISEP e a FiberSensing, foi proposto ao estagiário estudar e aprofundar a solução de medição de convergências em túneis: o SysTunnel.

Atualmente a solução de monitorização estrutural de túneis utilizada pela FiberSensing é uma solução desenhada em conjunto com a EPOS e o Cegeo (IST), baseada em sensores de Bragg em fibra ótica.

A solução apresenta alguns pontos que podem ser melhorados em termos práticos e em termos de algoritmia, nomeadamente:

- O desenho da solução para a sua aplicação em estruturas durante a fase construtiva;
- O desenho da solução para a sua aplicação em túneis de secção não regular;
- A determinação de convergências sem necessidade de parâmetros dependentes das características do terreno.

Durante o tempo de estágio, previsto com duração de 6 meses, foi proposto ao estagiário realizar as seguintes tarefas:

- Pesquisa de soluções existentes no mercado para medição de convergências em túneis;
- Estudo da tecnologia de redes de Bragg em fibra ótica;

- Estudo da solução SysTunnel existente e abordagens de método já realizadas na FiberSensing;
- Desenho de melhoria de solução/solução alternativa:
 - Desenho de protótipo;
 - Assemblagem de protótipo;
 - Algoritmia;
 - Programação;
- Validação da solução:
 - Testes nas instalações da FiberSensing e em campo.

1.3 FiberSensing – A Empresa

A FiberSensing é hoje uma empresa líder mundial no desenvolvimento e produção dos mais diversos sistemas de monitorização baseados em fibra óticas, Bragg Grating (FBG).

A FiberSensing foi inaugurada em Abril de 2004, nomeada sociedade anónima, tendo como acionistas o INESC Porto, os promotores individuais Alberto Maia, Francisco Araújo José Luís Santos, Luís Ferreira, Pedro Alves, a PME Capital e o Fundo de Sindicação PME-IAPMEL.

A missão da FiberSensing reflete a sua ideia de negócio e a sua posição no mercado “fornecer aos clientes sistemas avançados de monitorização de estruturas, baseados em sensores de fibra ótica, com elevado desempenho e custo competitivo. Estabelecer parcerias estratégicas de forma a exceder as expectativas dos clientes, promover a inovação tecnológica e a criação de riqueza” (FiberSensing, Dossier da Empresa, 2014).

A FiberSensing apresenta soluções para automatizar a monitorização de estruturas, desde a medição com sensores à análise de resultados dos mesmos. Desenvolve, comercializa e suporta sensores e unidades de medição baseados em tecnologia de rede de Bragg em fibra ótica e software de gestão de dados. Integrando os vários componentes de um sistema de monitorização estrutural apenas numa única interface, possibilitando aos seus clientes uma diminuição sobre os custos totais.

Os principais mercados de interesse da FiberSensing são o de engenharia civil, geotecnia, IeD, Energia, SHM, Serviços, Eólica, Indústria. Devido ao avanço tecnológico e às crescentes exigências de monitorização destas áreas são hoje exploradas e bem conhecidas as potencialidades desta tecnologia. O objetivo primário passa por aumentar a competitividade pela redução de custos por optimização de processos sem prejuízos de segurança (FiberSensing, Dossier da Empresa, 2014).

1.4 Estrutura do relatório

O relatório é composto no seu todo por sete capítulos. Encadeados de forma lógica os Capítulos dividem-se de forma a contemplar os temas distintos nos quais se baseia o tema do relatório.

Depois do capítulo introdutório, onde é contextualizado a tecnologia de sensores em fibra ótica na monitorização de convergências em túneis, apresenta-se no Capítulo 2 um estudo sobre diferentes tecnologias e soluções existentes no mercado para o efeito.

No capítulo 3 é descrita a tecnologia associada aos sensores baseados na tecnologia da fibra ótica. São sucintamente descritos os princípios gerais da fibra ótica e abordadas as redes de Bragg como sensores. Descrevem-se no final deste Capítulo os elementos constituintes de um sistema de monitorização em fibra ótica.

A conceção e desenvolvimento da solução alternativa ao Systunnel, é objeto de estudo do Capítulo 4. É documentado o processo de elaboração e dimensionamento dos elementos do novo sensor, tal como as etapas realizadas para a sua montagem em laboratório.

São apresentados, no Capítulo 5, os testes de calibração do sensor. É feita uma descrição sobre os vários testes efectuados ao sensor tais como os respectivos resultados obtidos.

Depois de descrito o funcionamento do sensor e apresentados os testes de calibração do mesmo apresenta-se no Capítulo 6 um estudo focado no sistema de medição de convergências em túneis baseado no sensor desenvolvido.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho. Em forma de resumo são apresentados os principais resultados e os objetivos atingidos. Por último são apontadas algumas sugestões de desenvolvimentos futuros.

É ainda apresentado, no Anexo 1, uma descrição detalhada dos respetivos ensaios realizados no sensor, bem como os respetivos resultados e conclusões.

2 Estudo de soluções para medição de convergências

2.1 Introdução

A monitorização de túneis entende-se como todo o processo de observação e análise de todas as grandezas que interferem com a segurança dos túneis, em ambas as suas fases de vida, de construção e serviço.

O objetivo da monitorização em obras geotécnicas passa por prever o comportamento e as características do terreno envolvente, de modo a perceber o seu possível comportamento quando sujeito às mais variáveis ações. Em obras de arte como os túneis, este comportamento torna-se de difícil compreensão e análise quando visto os estes serem obras de desenvolvimento linear, o que significa que em certos pontos do maciço o conhecimento do meio geotécnico terá que ser realizado de forma empírica visto os ensaios de prospeção serem feitos apenas em determinados locais.

O comportamento estrutural de um túnel é tido como um fenómeno complexo onde existem numerosos fatores de influência. A estabilidade da obra vai depender, principalmente, das características do suporte adotado e do seu modo de colocação, da forma da cavidade, da natureza das formações envolvidas (estratificação do maciço, nível freático, características resistentes do maciço), do estado de tensão inicial instalado no maciço e, especialmente, do método construtivo adotado (Sousa, 2001).

Existem vários equipamentos e dispositivos de observação utilizados na observação e monitorização de túneis, contudo ao longo deste capítulo serão apenas focadas as soluções existentes para a medição de convergências de obras subterrâneas.

A medição de convergências permite a obtenção dos deslocamentos relativos, de contração ou expansão, entre dois ou mais pontos inseridos na secção estudada do perímetro do túnel.

A partir de uma rede de pontos de referência distribuídos numa secção transversal, pode controlar-se o estado de deformação geral, ou seja, medir a variação da distância entre dois pontos na parede do revestimento ou do suporte, permitindo acompanhar a evolução do fecho das cavidades e avaliar situações de instabilidade quando a variação de deslocamentos sofre uma grande modificação, tanto em termos absolutos como de evolução de evolução da taxa de variação. É possível efetuar medições de convergências entre vários pontos, em direções horizontais ou em várias direções inclinadas, tal como o exemplo apresentado na Figura 2.

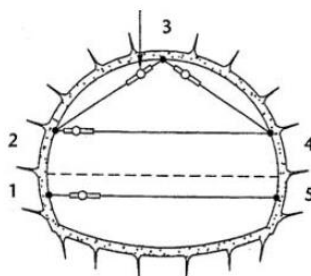


Figura 2 – Exemplo de medição de convergências na secção de um túnel (Sousa, 2001).

A escolha do método de medição de convergências mais apropriado a utilizar recai nos diferentes fatores que os fazem diferenciar entre si: precisão, manobrabilidade, versatilidade, e que não conduza a condicionalismos ao normal funcionamento do túnel.

Com recurso a meios topográficos ou fotogramétricos, aplicados na determinação dos assentamentos superficiais ou através do uso de convergenciómetros, são efetuadas as medidas de convergência entre pontos na parede ou no suporte das aberturas. Os convergenciómetros são equipamentos de medição de distância que usualmente incluem deflectómetros. Através deste tipo de equipamento é possível obter precisões superiores a 0,1 mm (Amaral, 2006). É aconselhável que as medições de convergências, durante a construção da obra subterrânea, sejam realizadas na frente de escavação, visto ser o local de maior risco.

2.2 Soluções de monitorização de convergências

2.2.1 Cinta extensométrica digital

A cinta extensométrica, conforme ilustrado na Figura 3, é um dispositivo portátil com capacidade de medição de deslocamentos entre pares de pernos de referência instalados sobre uma escavação. É composta por uma tira de aço inoxidável para a medição, e por um componente que contém um visor LCD de leitura digital o que facilita a sua utilização. A Figura 4 representa a sua instalação num túnel. De elevada precisão e robustez a cinta extensométrica é utilizada aquando da obtenção de movimentos radiais ou de convergências em túneis (Soil Instruments, 2007)



Figura 3 – Cinta extensométrica digital (Soil Instruments, 2007).

Apresenta como principais características o facto de ser um instrumento compacto e leve, simples, fiável, de fácil leitura de dados, e a cinta de medida ser inoxidável e poder ser utilizada até distâncias de 30 m.

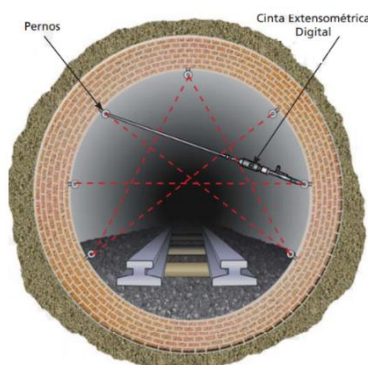


Figura 4 – Instalação de cintas extensométricas em túneis (Soil Instruments, 2007).

As cintas ficam presas nos pernos, e através do ajuste da tensão na correia é possível obter leituras com precisão na ordem dos 0,1 mm.

2.2.2 Convergeciómetro de haste

O convergeciómetro de haste é uma solução mais apropriada para secções de pequenas dimensões. Este dispositivo, ilustrado na Figura 5 é composto por um tubo de duralumínio (com o objetivo de reduzir o seu peso próprio), com pinças de nylon nas extremidades, no interior do qual se descolam dois tubos, sendo estes igualmente de duralumínio. As pinças permitem que os tubos de alumínio deslizem sem que estas se toquem entre si.

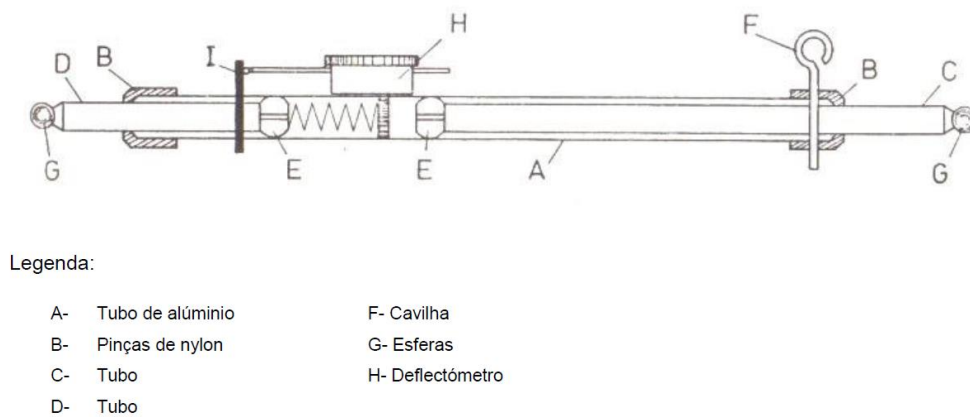


Figura 5 – Convergeciómetro de haste (LNEC, 1980)

Com recurso ao defletómetro consegue-se obter a leitura da variação da distância ocorrida entre os dois tubos. É possível com este dispositivo obter um campo de medida de 50 mm com uma resolução de 0,01 mm (LNEC, 1980).

2.2.3 Convergenciómetro de fita

Ao contrário do convergenciómetro de haste esta solução é utilizada para distâncias superiores a 5 m podendo até mesmo chegar aos 12 m.

Distingue-se do convergenciómetro de haste pelo facto de a leitura ser realizada por recurso a uma fita colocada sob tensão, estando ambas as suas duas extremidades fixas, tal como se representa na Figura 6.

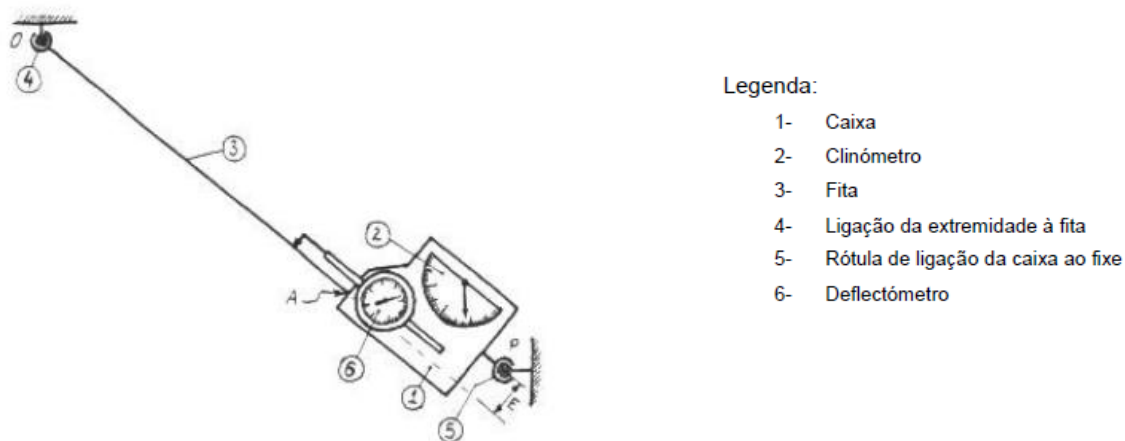


Figura 6 – Convergenciómetro de fita e respetiva legenda (LNEC, 1984)

O dispositivo é equipado com um clinómetro que permite obter a orientação do convergenciómetro em relação a uma direção de referência (LNEC, 1984). Este equipamento está ilustrado na Figura 7.

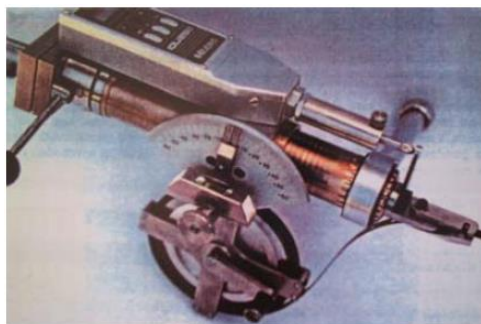


Figura 7 - Convergenciómetro de fio do LNEC (Sousa, 2001)

2.2.4 Sistema de medição ótico 3D

As medições 3D geodésicas com alvos refletores óticos usando estação total com medição da distância integrada, dão informação sobre a resposta da estrutura subterrânea nos pontos selecionados.

A precisão geral deste método é bastante elevada, encontrando-se na gama dos mm. Esta depende da precisão da aplicação do instrumento geodésico, do tipo de refletores, a distância aos refletores e as condições do túnel.

O número de alvos que são montados sobre o revestimento primário em cada secção do túnel monitorizado e as distâncias entre as secções dependem das condições geológicas e do diâmetro do túnel. A distância típica entre secções monitorizadas é de um a duas vezes o diâmetro do túnel. Devido à alta precisão deste método, a medição de convergências 3D com a estação total torna-se uma prática utilizada em vários locais do mundo (Wang, 1998).

O sistema de medição ótico 3D consiste nos seguintes principais componentes: estação total, alvos especiais bireflex, e requisitos de *hardware* incluindo: computador ou *notebook*, interface para transferência de dados para PC, dispositivos de saída e abrangente sistema de software, incluindo gestão de base de dados, cálculos geodésicos, avaliação gráfica, utilitários e os drivers (Figura 8).



Figura 8 – Targos de Bireflex, pinos de convergência e assentamento (Wang, 1998).

As convergências medidas por fitas extensométricas permitem obter uma visão geral sobre a deformação do túnel, contudo não são aconselhados para uma avaliação do movimento real de um ponto. O sistema de medição ótica 3D permite um registo automático dos dados, adequado para uma rápida avaliação de um grande número de dados/informação.

2.2.5 Basset Convergence System

O sistema de convergência de Basset permite uma monitorização automática de uma secção de um túnel (Durham GeoSlope Indicator, 2007). Este é um sistema atualmente comercializado pela empresa *Soil Instruments* e a sua aplicação visa a observação do comportamento de túneis e de outras aberturas subterrâneas de modo a verificar se o desempenho real se encontra em conformidade com o estimado, a monitorização das deformações devido à atividades de construções vizinhas e a monitorização em túneis ainda em fase de construção para garantir a segurança na fase mais crítica do período de vida de um túnel.

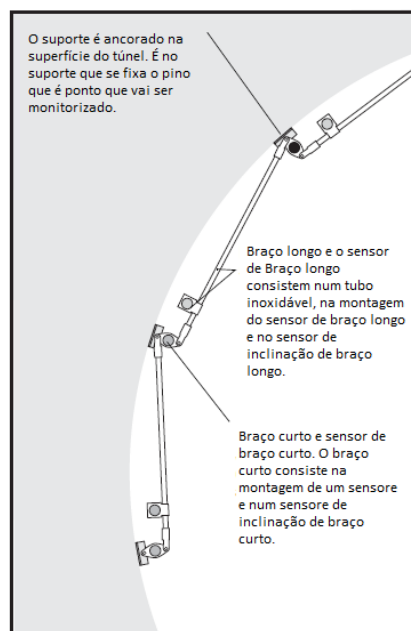


Figura 9 - Exemplo representativo do sistema de Basset

O sistema Basset usa sensores de inclinação para monitorizar a posição de pinos de referência instalados na secção do túnel em estudo. Os sensores são ligados aos pinos por meio de um sistema de braços de pequeno comprimento. Qualquer deslocamento sofrido pelos pinos altera a inclinação dos respetivos braços ligados e resulta então numa de leitura da variação da inclinação. São utilizados dois braços de diferentes comprimentos como se pode verificar na Figura 9.

Em intervalos regulares, um registador de dados obtém um levantamento da secção do túnel através da gravação de uma leitura de cada sensor de inclinação. O processo requer cinco a dez segundos, dependendo do número de sensores no sistema (Soil Instruments, 2007).

Através de um software personalizado é possível registar os dados, calcular os dados de deslocamentos e gerar uma visualização gráfica da secção do túnel.

A instalação do sistema de Basset passa pelas seguintes etapas:

1. Estabelecer um local para a disposição do computador.
2. Instalar os suportes de montagem no revestimento do túnel.
3. Instalar e alinhar os pinos de articulação nos suportes de montagem.
4. Instalar os braços curtos.
5. Instalar os braços longos.
6. Instalar os sensores.
7. Instalar o sistema de registo de dados.
8. Realizar testes e zerar o equipamento.

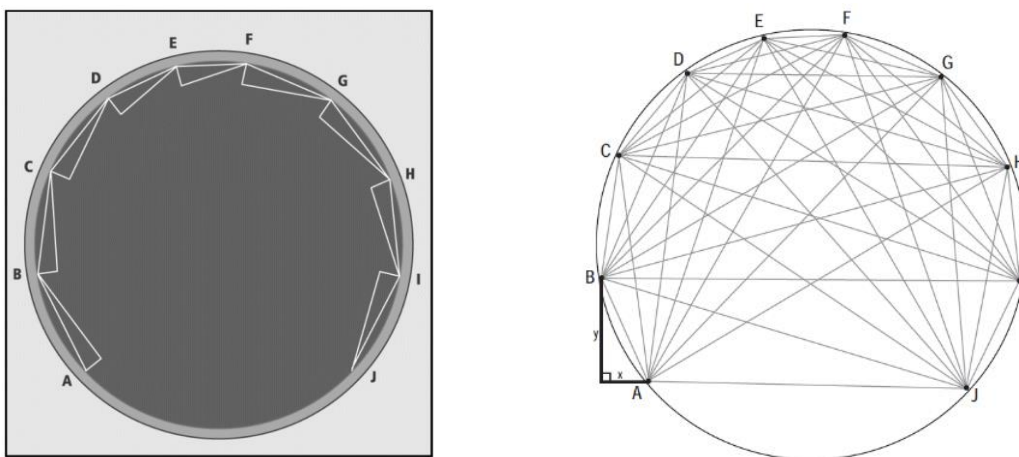


Figura 10 - Representação das convergências possíveis de medir com o método de Basset (Basset-system datasheet).

Após instalação, através de um instrumento ótico é possível obter-se as coordenadas de todos os pinos de articulação fixos. É possível igualmente obter as distâncias entre cada pino.

A configuração representada na Figura 10, é uma solução especificamente pensada para túneis e, visto ser fixada próxima da parede do túnel não interfere com o tráfego. Ao contrário de outros sistemas óticos, o sistema de Basset não tem requisitos em termos de linha de visão e pode ser instalado em torno de cantos. O sistema apresenta também como vantagem em comparação aos outros sistemas apresentado não ser afetado por mudanças do índice de refração do ar causado pela passagem de um comboio. Encontra-se apresentada na Figura 11 a instalação do sistema Basset em uma secção de um túnel.



Figura 11 - Instalação do sistema de Basset num túnel de Londres (Soil Instruments, 2007).

O sistema de Basset consegue, num espaço de segundos, gerar os deslocamentos sofridos pelo túnel, o que se mostra muito importante para a proteção de comboios na proximidade de uma construção vizinha.

2.2.6 MEMCOT – Método Extensométrico para Monitorizar Convergências em Túneis

O método Extensométrico para Monitorizar Convergências em Túneis (abreviadamente MEMCOT) foi desenvolvido com o objetivo de avaliar continuamente a estabilidade de túneis em fase de construção ou serviço. Contrariamente aos métodos convencionais utilizados para a medição de convergências entre pontos pré-definidos do contorno da secção dos túneis, o MEMCOT, tal como o método basset e os métodos topográficos automáticos, não se restringe apenas a medições pontuais realizadas periodicamente, nem interrompe a realização dos trabalhos de construção, ou de exploração do túnel (Dinis da Gama, 2004).

O MEMCOT consiste na contínua monitorização do túnel, medindo as deformações ao longo do contorno da secção em estudo e transformando-as em convergências por meio de um algoritmo apropriado. Este método permite então quantificar as convergências (deslocamentos relativos) do suporte e da evolução da geometria ao longo do tempo.

Segundo o autor, Dinis da Gama, outra das vantagens deste método consiste na possibilidade da consulta interativa dos dados de convergência instantâneas ou acumulados, assim como das velocidades de convergência calculadas entre quaisquer intervalos de tempo escolhidos pelo utilizador, e ao longo de direções ortogonais ou inclinadas em que se determinem as convergências.

2.3 SysTunnel

O SysTunnel é um sistema completo de monitorização de túneis, o qual permite a medição de deformações, convergências e temperatura, com recurso unicamente a fibras óticas permite uma análise destas grandezas em diferentes secções.

O sistema do SysTunnel nasceu de uma parceria entre a FiberSensing com a EPOS e o Professor Carlos Dinis da Gama do Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico.

Tratando-se do sistema até à data aplicado pela FiberSensing e a partir do qual se processou o desenvolvimento do novo sensor alvo deste relatório, descreve-se nos pontos seguintes em mais detalhe o seu princípio de atuação.

2.3.1 Descrição Geral

O sistema de monitorização SysTunnel, conforme ilustrado na Figura 12, utiliza um perfil instrumentado por secção do túnel, possuindo um total de 8 sensores (7 sensores de deformação, S0 a S6) e 1 de temperatura, (S8). Este conjunto constitui um dos ramos da rede global de sensores e está diretamente ligado ao sistema de medição através de um cabo de fibras óticas. Normalmente o sistema de medição encontra-se localizado num armário técnico, localizado no exterior do túnel.

Como principais constituintes do SysTunnel referem-se os seguintes:

- Perfis metálicos instrumentados com sensores de deformação e temperatura em fibra ótica (Perfil por secção de estudo).
- Sistema remoto de medição de sensores de fibra ótica.

- Aplicação de *software* com algoritmo de cálculo de convergências, baseado nas medições de deformação e temperatura efetuadas em pontos predefinidos dos contornos das secções instrumentadas.
- Cablagens em fibra ótica.
- *Software* de Gestão de Dados (opcional).

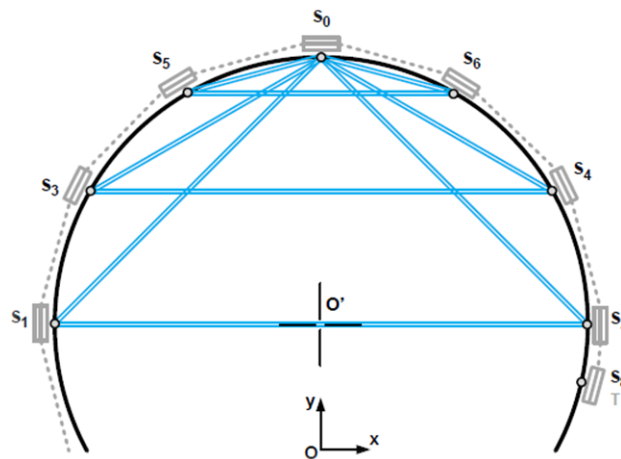


Figura 12 – Disposição dos sensores sobre a barra metálica inoxidável (FiberSensing, 2013).

Os perfis a instalar no túnel são em aço inox, com cerca de 400 mm de largura e 4 mm de espessura. Estes perfis são aplicados ao longo do desenvolvimento do túnel e funcionam como unidades estruturais onde são inseridos os sensores.

Os sensores de deformação e temperaturas utilizados são do tipo *weldable* (soldável). A partir de um sistema portátil de soldadura por pontos é possível recorrer a instalação dos sensores, procurando-se primeiro fazer uma limpeza preliminar das impurezas do perfil. Os sensores devem de ser impermeabilizados logo de seguida a sua soldadura, e protegidos igualmente por uma proteção mecânica com tampas metálicas recorrendo também a soldadura para a sua aplicação. Com recurso a cabos de fibra ótica de diâmetro de 3 mm realizam-se as ligações entre os sensores e as caixas de união, bem como entre o perfil

instrumentado e a caixa de derivação. Esta última contém o acesso ao cabo de fibra ótica multifibra que permite a ligação dos sensores ao armário técnico. Estes são cabos comuns usados de forma *standard* nas redes de telecomunicações. Todas as ligações não permanentes entre fibras são realizadas por intermédio de conexões FC/APC enquanto que as permanentes são realizadas por fusão da fibra.

2.3.2 Sensores utilizados no SysTunnel

a) Sensor Soldável de deformação

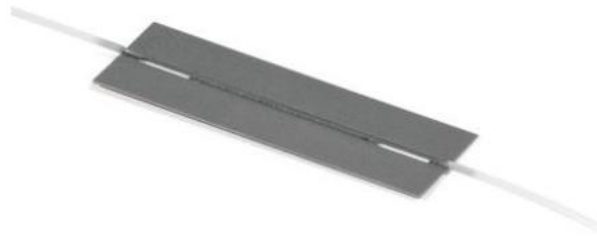


Figura 13 – Sensor soldável de deformação (FiberSensing, 2013)

A Figura 13 apresenta o sensor soldável de deformação aplicado no SysTunnel. Este sensor é constituído por uma proteção de aço inoxidável contendo o elemento de deteção (FBG), o qual é soldado a laser à base de aço inoxidável que é utilizado para a soldadura local direta à estrutura metálica. As fibras de entrada e saída são protegidas por um tampão de 900 μm . Uma tampa de aço inoxidável é utilizada como proteção e é soldada diretamente à estrutura. A partir desta tampa de proteção, as fibras de entrada e de saída podem sair e entrar já protegidas com 3 mm de PVC.

b) Sensor Soldável de Temperatura



Figura 14 – Sensor soldável de temperatura (FiberSensing, 2013)

O sensor soldável de temperatura, apresentado na Figura 14 tem exatamente a mesma concepção mecânica que o de deformação, contudo o elemento sensor, é devidamente isolado no interior de um tubo de aço inoxidável.

No armário técnico existe uma unidade de medição de sensores de fibra ótica , onde é possível configurar, ler, processar, armazenar e transmitir automaticamente os dados relativos às medições efetuadas pelos sensores instalados no túnel. No seu interior está instalada a aplicação de *software* que tem por base o algoritmo de cálculo de convergências.

O sistema permite obter, com uma periodicidade programável na unidade ou remotamente, os valores das deformações em sete pontos pré-definidos, correspondentes aos sensores de deformação, de cada uma das secções do túnel, bem como a temperatura de cada uma das secções. Utilizando as coordenadas iniciais de cada sensor obtidas por topografia aquando da sua instalação, o sistema calcula também as coordenadas relativas à calibração inicial de todos os pontos e, a partir destas, os valores das convergências.

2.3.3 Instalação

Devido ao elevado perímetro do contorno das secções dos túneis típicos, o perfil instrumentado pode ser inicialmente constituído por várias peças que são posteriormente unificadas de forma a garantir a total uniformidade e conformidade.

A instalação e proteção dos sensores e dos cabos óticos que os ligam em cada uma das peças que constituem o perfil são realizadas antes do transporte para os túneis.

A montagem dos perfis instrumentados completos ocorre já dentro do túnel, junto das secções onde serão instalados. Para tal, são solidarizadas as peças que o constituem e efetuadas e protegidas as ligações óticas necessárias. Cada perfil, calandrado de acordo com a secção respetiva, é depois solidarizado ao revestimento definitivo através de uma resina epóxi especialmente destinada a aplicação entre betão e elementos metálicos.

Os perfis devem ser devidamente fixados próximo da soleira, operação imprescindível para o correto funcionamento do algoritmo. Também importante nesta fase é o recurso a métodos topográficos de forma a garantir a verticalidade dos perfis na altura da sua instalação.

Após a fixação dos perfis, procede-se à instalação dos cabos óticos que permitem a ligação dos ramos de sensores ao armário técnico, que deverá ser colocado em local seguro. A distância entre os sensores e o armário técnico pode ir até alguns Kilómetros..

Por topografia, são obtidas as coordenadas absolutas de cada um dos sensores no momento de instalação. Nesta fase, serão ainda registados os valores iniciais dos diversos sensores através da conectorização de perfis de uma unidade de medição portátil a cada um dos perfis instrumentados.

2.3.4 Modelo matemático

Depois dos resultados dos primeiros testes, o modelo matemático foi desenvolvido baseado na teoria da elasticidade, onde a partir de expressões, relacionam as deformações e os deslocamentos nas direções radiais e tangenciais para um estado de tensão bidimensional, em coordenadas polares.

O modelo matemático foi então atualizado utilizando a teoria das barras inicialmente curvas. Esta teoria permite a modelagem quantitativa do deslocamento radial em função da deformação axial que está a ser medida (FiberSensing, 2013).

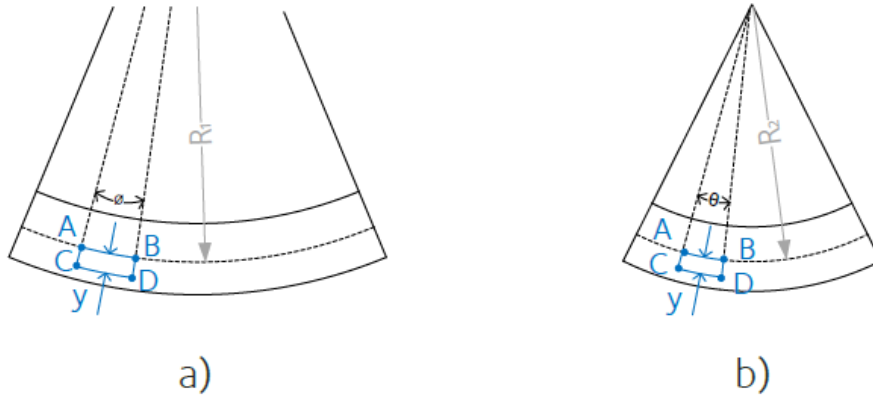


Figura 15 – Flexão de barras inicialmente curvas: a) antes da flexão; b) depois da flexão

Quando uma barra, com um raio inicial R , é submetida a um carregamento exterior ou momento, flete-se criando uma deformação axial ϵ_x numa secção localizada a uma distância y do eixo neutro. Considere-se a barra curva sem cargas e sujeita a flexão como se apresenta na Figura 15. Assumindo que as secções planas se mantêm planas após carregamento, a tensão num pequeno segmento CD a uma distância y do eixo neutro é dada por:

$$\epsilon_{CD} = \frac{\Delta l_{CD}}{l_{CD}} = \frac{(R_2 + y)\theta - (R_1 + y)\theta}{(R_1 + y)\theta} = \frac{R_2\theta + y\theta - R_1\theta - y\theta}{(R_1 + y)\theta} = \frac{y\theta - y\theta}{(R_1 + y)\theta}$$

E como para um elemento que esteja no eixo neutro não há alteração no comprimento:

$$R_2\theta = R_1\theta \Leftrightarrow \theta = \frac{R_1\theta}{R_2}$$

Encontrando o ângulo θ e inserindo na última expressão tem-se que:

$$\varepsilon_{CD} = \frac{y(\frac{R_1}{R_2}\theta - \theta)}{(R_1 - y)\theta} = \frac{y(\frac{R_1}{R_2} - 1)}{(R_1 + y)} = \frac{y(R_1 - R_2)}{R_2(R_1 + y)}$$

O deslocamento radial pode ser encontrado recorrendo a seguinte equação:

$$\delta = R_1 - R_2 = \frac{\varepsilon_x R_1 (y + R_1)}{\varepsilon_x R_1 + y(1 + \varepsilon_x)}$$

Nesta aplicação, os sensores de deformação, conjuntamente com os de temperatura medem deformação compensada do efeito de temperatura em sete posições conhecidas da secção do túnel.

Uma vez que o perfil metálico é colado à superfície da estrutura, que pelo seu lado está em contacto com o terreno envolvente, a distância do eixo neutro torna-se difícil de estimar. Depois de alguns ensaios *in situ* realizados pelo Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (CEGEO) no Túnel da Falagueira foi possível confirmar o conceito de “arco de pressão” que pressupõe a existência de um volume de descompressão do terreno acima do túnel, o qual transmite a carga ao sistema de suporte. Esta suposição envolve a ação conjunta do terreno e do suporte, deformando-se em conjunto sobre um estado de compressão, para que a variável y dependa da espessura do arco de pressões como proposto por *Terzaghi* e mais tarde modificado por vários autores.

Baseado nos valores numéricos da Figura 16, a curva principal é dada pela seguinte expressão, onde a incógnita R representa o RQD do solo circundante com um coeficiente de correlação de 0.9926:

$$n = -5 \times 10^{-6} R^3 - 0.0725 R + 2.69$$

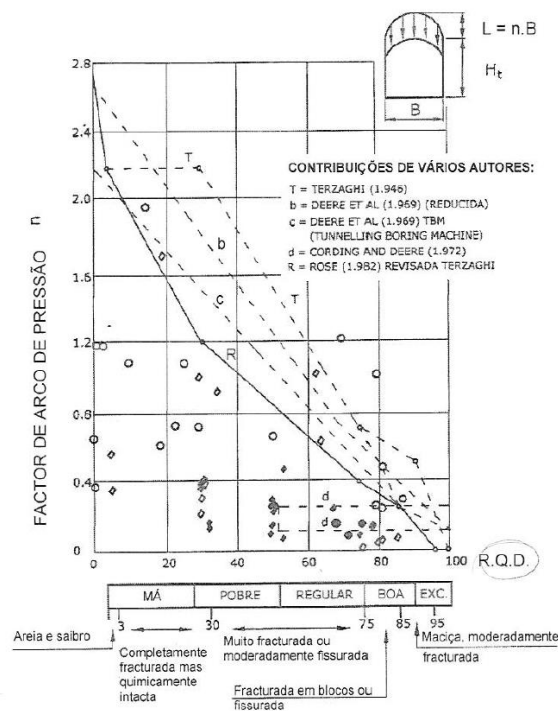


Figura 16 - Variação do tamanho do arco de pressão em torno dos túneis com o RQD do maciço, segundo o critério de Terzaghi, modificado por Rose (1982) e segundo (Ucar, 2004).

É de referir que aquando da instalação de pregagens no teto e hasteais dos túneis, prevalece esta instalação, devendo-se atribuir a y um valor equivalente ao comprimento útil das pregagens.

Tendo conhecimento das coordenadas (x,y) dos sensores é possível determinar o centro da circunferência a que pertencem (usando 3 pontos pertencentes à mesma circunferência têm-se constantes suficientes para resolver as equações paramétricas do círculo) e igualmente o seu raio inicial R_1 . Através dos dados geotécnicos estima-se o valor de y , como explicado acima. Conhecendo o deslocamento radial de cada ponto podem-se encontrar diversas variáveis nomeadamente as coordenadas finais, ou seja, a deformação do túnel e a convergência entre dois pontos.

Uma vez que o método extensométrico de medida de convergências mede deslocamentos absolutos de cada ponto, as mudanças geométricas assimétricas na secção podem ser assim

detetadas. Note-se que com medições de convergências apenas se pode assumir que os movimentos sejam simétricos. Avaliando as deformações dos túneis, esta é outra das vantagens deste método em comparação com os métodos tradicionais.

2.3.4.1 Índice de Qualidade do Maciço Rochoso (RQD)

A designação do índice de qualidade da rocha (RQD) foi introduzida há mais de 50 anos num momento em que a informação de qualidade da rocha era geralmente disponível apenas a partir de descrições de geólogos e pela percentagem de recuperação do núcleo. O RQD representa a percentagem de recuperação do núcleo.

Simplificadamente o índice RQD mede a percentagem de “boa rocha” no interior de um furo de sondagem. Foi desenvolvido originalmente como um meio de descrever qualitativamente se um maciço rochoso proporciona condições favoráveis de implementar um túnel. Hoje em dia é reconhecido como um parâmetro padrão e forma um elemento básico do sistema de classificação de maciços rochosos. A simplicidade deste índice reflete a sua vantagem, o que permite a delimitação de zonas pobres de rocha que podem por em causa e afetar em gravidade as estruturas de engenharia (Deere & Deere, 1988).

O RQD é então definido como a percentagem determinada pelo quociente entre o somatório dos troços de amostra com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total furado em cada furo de sondagem. São classificadas no Quadro 1 as diferentes qualidades dos maciços rochosos.

Quadro 1 - Classificação dos maciços com base no RQD.

R.Q.D	Qualidade do Maciço Rochoso
0-25%	Muito fraco
25-50%	Fraco
50-75%	Razoável
75-90%	Bom
90-100%	Excelente

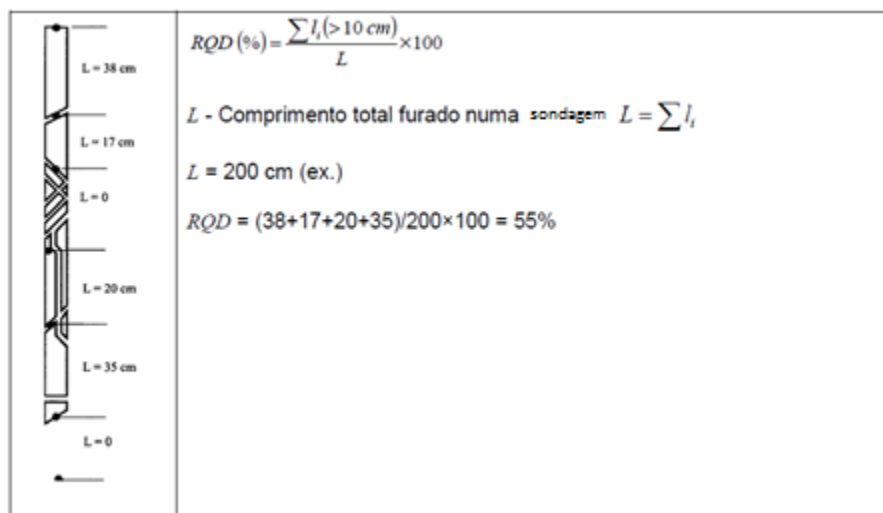


Figura 17 – Procedimento para a medição e cálculo do RQD (FEUP)

É apresentado na Figura 17 uma exemplo prático do cálculo do RQD de uma sondagem. Quando não for possível obter amostras com recurso a sondagens mas que sejam identificáveis traços das descontinuidades em afloramento rochosos ou escavações, Palmström (1982) indica um estimado valor de RQD através da relação:

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Onde o valor de J_v representa o índice volumétrico (somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento, para o conjunto das famílias).

É de referir que o RQD é um parâmetro que depende da direção da amostragem podendo o seu valor variar significativamente em função da orientação das sondagens. O recurso ao índice volumétrico, para estimar o valor de RQD pode apresentar-se como uma vantagem visto reduzir esta dependência.

Aquando da observação de amostras obtidas por furação, deverá ter-se em atenção as diferentes origens das fraturas presentes na amostra, distinguir as fraturas naturais das fraturas decorrentes do processo de extração da amostra ou das fraturada originadas pelo manuseamento do equipamento, devendo estas últimas ser ignoradas no cálculo do RQD. Por conseguinte quando utilizada a relação devida a Palmström, as fraturas originadas devido a explosivos não devem ser contabilizadas (Deere & Deere, 1988).

Contudo o RQD apresenta algumas desvantagens e limitações, existem outras descontinuidades que podem igualmente caracterizar a estrutura geológica do maciço tal como as superfícies de estratificação e xistosidade. Facto este que condiciona o algoritmo de cálculo de convergências do SysTunnel, e por tal motivo ser objeto de estudo.

2.3.5 Testes ao sistema

Foi criado um modelo à escala real, instalado na FiberSensing, com o objetivo de efectuar a calibração e os respetivos testes. Foram montados dois diferentes modelos, de modo a recriar as duas diferentes secções existentes no túnel do Rossio (Figura 18). O modelo foi projetado tendo em consideração o facto de ser possível aplicar cargas pontuais sem colocar a estrutura em risco de plastificação ou colapso. Ambos os modelos incluem um perfil HEA120 fixado ao chão por recurso a âncoras mecânicas.



Figura 18 - Modelos à escala real das secções o túnel do Rossio (SysTunnel Application Note-v2).

Apresenta-se na Figura 19 resultados registados para o sensor S_0 (sensor que sofre maiores deslocamentos relativos e deslocamentos) tanto para o sistema ótico de monitorização como os resultados da estação total utilizada para comparação.

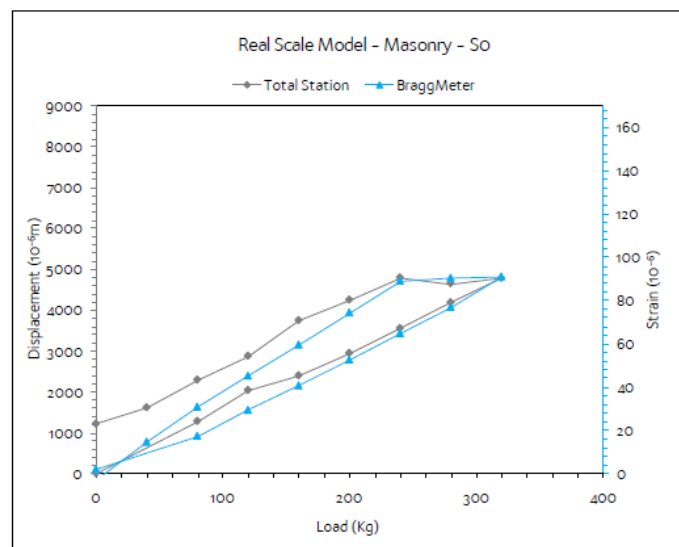


Figura 19- Resultados de testes ao sistema

3 Sensores baseados na tecnologia da fibra ótica

Tendo em conta que o sistema anteriormente apresentado, explorado pela FiberSensing, e os novos desenvolvimentos que se propõem envolvem a tecnologia da fibra ótica, faz-se, nestes capítulos uma introdução aos aspectos mais relevantes.

3.1 Introdução

As potencialidades da fibra ótica são hoje em dia bem conhecidas e estudadas pela comunidade científica e é atualmente considerada de elevada importância em todos os sectores tecnológicos.

O uso das fibras óticas como sensores é baseado numa proposição idêntica para todos os tipo de sensores, sendo que as ações externas têm impacto sobre as suas propriedades originando como consequência uma alteração nas características base da luz que propagam no seu interior. Em suma, pela deteção das variações ocorridas no interior de uma fibra é possível conhecer as alterações ocorridas no seu meio envolvente.

É portanto imprescindível o estudo e exploração de todas as diferentes propriedades das fibras e da luz. É possível nos nossos dias ter-se acesso a número extenso de diferentes sensores em fibra ótica.

Uma das grandes vantagens da fibra ótica é a sua capacidade de transmitir uma grande quantidade de informação, com maior velocidade, de que todas as outras tecnologias elétricas. Devido ao contínuo desenvolvimento desta área de estudo e o esforço conjunto da comunidade científica, é atualmente possível a produção de fibras com um melhor desempenho.

3.2 A fibra ótica

Uma fibra ótica, geralmente em vidro, é um filamento capaz de ser atravessado por um feixe de luz o qual é refletido no interior da fibra por reflexões consecutivas (Figura 20).



Figura 20 – Escala real de fibras óticas (Ribeiro, 2009)

Basicamente uma fibra ótica, como se comprova na Figura 21, é constituída por materiais dielétricos (isolantes) os quais permitem a total imunidade a interferências eletromagnéticas, por uma região cilíndrica denominada de núcleo, pelo qual é transmitida a luz, e por uma região periférica composta pela bainha e pelos revestimentos (primário e secundário).

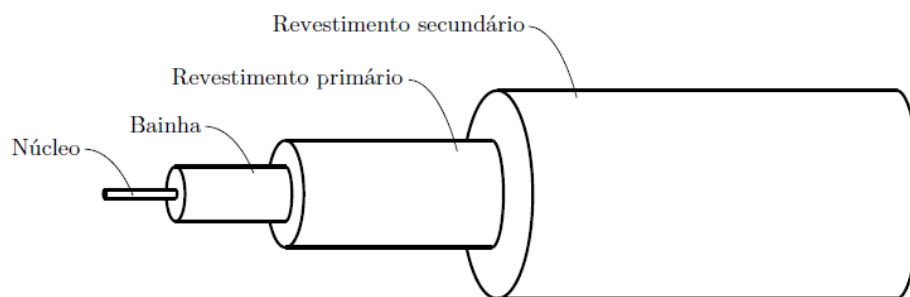


Figura 21 - Representação esquemática da estrutura de uma fibra ótica (Rodrigues C. , 2001)

Os revestimentos representam um papel fundamental na resistência à fadiga e atenuação ótica. Têm também como função proteger a fibra de ações externas como a abrasão ou a

fadiga. O núcleo e a bainha apresentam-se como as camadas funcionais responsáveis pela condução da luz ao longo da fibra ótica. Visto existir uma diferença de características entre estes dois meios ocorre o fenómeno de reflexão interna total. Fenómeno este que permite que a luz permaneça na fibra ótica através da reflexão ocorrida na fronteira dos dois meios, evitando perdas exteriores (Figura 22).



Figura 22 – Imagem representativa da reflexão interna total (Pires, 2013)

Quanto ao revestimento primário, já atrás referido, tem como função proteger a sílica a ataques químicos e conferir resistência mecânica ao conjunto. Este revestimento é geralmente composto por acrilato ou por poliamida aderente à fibra. No comportamento mecânico do conjunto esta componente faz-se valorizar pela sua importância tanto na flexibilidade da fibra como na minimização das perdas devido a microcurvaturas.

A última componente do conjunto, a proteção secundária, geralmente plástica ou metálica, contribui para uma maior robustez da fibra.

A sílica (SiO_2) é uma substância que existe na forma natural como quartzo. Pode também ser produzido sinteticamente e apresenta perda óticas internas relativamente baixas, propriedade que torna este material ideal para fabricação de fibras óticas de boa qualidade. Contudo, a sílica apresenta um índice de refração muito baixo em comparação ao vidro comum, o que dificulta a sua utilização pois é essencial, como já referido, que a capa externa do conjunto tenha um índice inferior ao núcleo. Para a sua possível utilização existem diversas técnicas especiais que foram desenvolvidas. Uma destas, conhecida como VDS (*vapour deposited sílica*) consiste na deposição de camadas radiais de germânio dopado

com sílica num tubo central (cerne) que consequentemente passará a ter um índice de refração maior.

A capacidade de transmissão da fibra, as suas frequências óticas, níveis de atenuação e características mecânicas são determinados pela sua geometria, perfil de índices, pelos materiais utilizados na sua composição e pelos processos recorridos na sua fabricação.

Todas as fibras óticas tem como característica um ângulo de admissão, igualmente conhecido como ângulo de aceitação, que é o ângulo limite de incidência da luz, em relação ao eixo, para que esta penetre no cabo. Os feixes de luz que têm um ângulo superior ao de admissão não satisfazem as condições para a reflexão total e, portanto, não são conduzidos ocorrendo perdas para o exterior devidos as perdas através da bainha. Este ângulo é traduzido pela lei de Snell (Hecht, 2002), esquematizada na Figura 23, e corresponde a uma característica específica de cada fibra ótica geralmente especificada por intermédio da abertura numérica, NA, de acordo com:

$$AN = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_{nu}^2 - n_{ba}^2}$$

Onde, θ_{max} é o ângulo que define o cone de aceitação; e n_{nu} e n_{ba} são os índices de refração efetivos do núcleo e da bainha da fibra ótica, respetivamente.

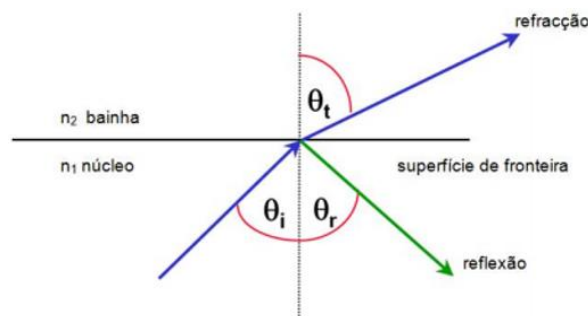


Figura 23 – Imagem Representativa da Lei de Snell (Ribeiro, 2009)

3.2.1 Tipos de fibra ótica

No que se refere ao tipo de perfil do índice de refração do núcleo é possível classificar dois tipos de fibras, monomodo ou multimodo. Os diferentes tipos de fibra são classificados em função da geometria e do perfil de índice de refração do núcleo, conforme se representa na Figura 24.

a) Fibras Multimodo

As fibras multimodo foram as primeiras a serem comercializadas. Neste tipo de fibra é possível que para apenas um cabo sejam transmitidos vários raios (modos). Esta existência de vários modos de propagação provoca a chamada dispersão modal, o que irá limitar a largura de banda. Este tipo de fibra é utilizado para baixas distâncias (iguais ou inferiores a 2 km). Dentro deste tipo existem dois tipos de fibras:

b) Fibra Multimodo Índice Degrau

A fibra multimodo com índice degrau caracteriza-se por ser uma fibra com dois índices de refração constantes, um referente ao núcleo e o outro referente à bainha, sendo este último um pouco inferior ao do núcleo. São normalmente fabricados com núcleo e cascas de sílica, podendo ser encontrada também com núcleo de sílica e casca de silicone. Possuem uma elevada atenuação, cerca de 5dB/km, e são utilizadas para curtas distâncias (dezenas e centenas de metros). A luz que percorre este tipo de fibra é refletida na linha divisória entre o núcleo e a bainha o que faz com que a luz seja propagada em “zigzague”.

c) Fibra Multimodo Índice Gradual

A fibra multimodo índice gradual distingue-se da do índice degrau pelo facto de possuir um índice de refração variável, decrescendo do núcleo para a casca. Este tipo de fibra é utilizado em telecomunicações, possuindo atenuações na ordem dos 3 dB/Km (para um $\lambda=850$ nm).

A luz não é então conduzida por múltiplas reflexões totais, mas sim refratada de volta para o centro do núcleo assemelhando-se a uma propagação ondulatória.

d) Fibras Monomodo

As fibras monomodo têm o núcleo com um menor diâmetro que as fibras multimodo. Apenas um único raio (modo) é conduzido e propagado de cada vez neste tipo, o que possibilita resolver o problema das diferenças nos comprimentos das trajetórias conseguindo uma largura de banda elevada (100 a 1000 vezes superiores as larguras das fibras de multimodo de índice degrau). São por isso adequadas para transmissão a grandes distâncias,

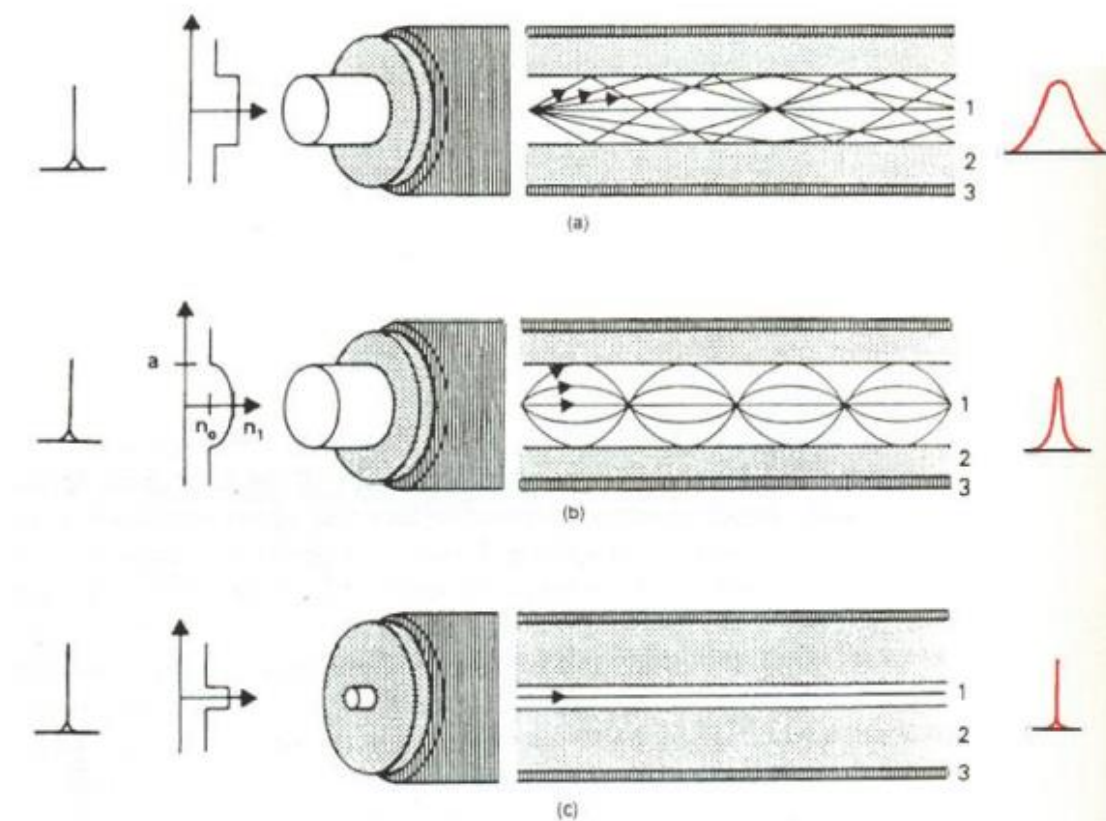


Figura 24 - Tipos de fibra ótica: a) índice degrau; b) Índice gradual; c) Fibra monomodo

3.2.2 Características das fibras óticas

O campo de aplicação das fibras vai desde a telefonia, televisão por cabos, automação industrial, computadores, medicina, equipamentos militares, cabos à monitorização de diversas estruturas. Atualmente as fibras óticas desempenham um papel fulcral na área da monitorização estrutural, o qual é retratado e documentado neste relatório.

A primeira geração dos sistemas de comunicações óticas usou fibras que operavam com comprimentos de ondas no valor de 850 nm, que vieram a ser substituídos pelos sistemas de segunda geração com comprimentos na região dos 1300 nm, a qual apresenta vantagens de menor atenuação ótica e dispersão material mínima. Os de terceira geração, com igual comprimento de onda aos de segunda, foram desenvolvidos com recurso a fibras do tipo monomodo. Atualmente, na quarta geração, é utilizada a região de comprimento de onda de 1550 nm. As gerações foram evoluindo tendo como base de desenvolvimento melhorar o espectro de atenuação, possibilitando desta forma encurtar a distância do sinal entre o emissor e o recetor de sinal ótico transmitido.

As propriedades físicas e mecânicas referentes às fibras óticas são apresentadas na Figura 25 (Inaudi, 1997).

Composição química	SiO ₂
Densidade [$\times 10^3$ kg/m ³]	2.2
Tensão de rotura [MPa]	5
Módulo de Young [GPa]	72
Coefficiente de Poisson	0.17
Extensão de rotura [%]	2-8
Coefficiente de dilatação térmica [$\times 10^{-6}$ °C ⁻¹]	0.5
Temperatura de fusão [°C]	1665
Índice de refração	1.46
Atenuação média [dB/km]	0.3
Dispersão média [ps/km.nm]	20

Figura 25 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra ótica

Em relação às propriedades óticas apresentadas é de referir a importância do índice de refração de 1.46 e para a reduzida atenuação média, valores que permitem a transmissão dos sinais de luz por vários quilómetros.

3.2.3 Propriedades da Fibra Ótica

As fibras óticas quando comparadas aos meios de comunicação formados por condutores metálicos apresentam um diverso número de vantagens, tais como os apresentados de seguida:

- **Baixa atenuação:** Define a quantidade do sinal transmitido que é perdido nos meios da transmissão. As perdas são medidas em decibéis (dB's) por unidade de comprimento (km). Para fibras multimodo as atenuações rondam os 3,0 dB/Km enquanto que para fibras monomodo as atenuações são menores ou iguais a 0,1 dB/Km. O facto de se conseguir uma atenuação de baixo valor significa um menor número de repetidores e enlaces mais longos, com uma consequente diminuição do custo de investimento e operação.
- **Largura de banda:** Para que o sistema não tenha perdas de informação é especificada uma faixa de frequências nas quais o sistema pode operar para transmitir informações.
- **Confiabilidade e segurança:** Nos sistemas convencionais as informações enviadas são possíveis de ser desorganizadas ou perdidas, devido a campos elétricos e magnéticos parasitas, o que não sucede nas fibras óticas. Sendo materiais dielétricos são imunes a este tipo de ataques. Destaca-se igualmente a boa resistência mecânica das fibras e a sua capacidade de apresentar um bom desempenho em ambientes hostis aos cabos de cobre, como é o caso da água.

- Dimensões: A fibra apresenta dimensões reduzidas e um diâmetro bastante fino. O seu diâmetro externo ronda os 100 μm .
- Flexibilidade mecânica: As fibras óticas são por norma flexíveis e fáceis de dobrar. Contudo, não é recomendado curvas acentuadas, apesar de serem de mais fácil instalação quando comparadas com alguns tipos de cabos de cobre.
- Abundância de matéria prima: As reservas mundiais de cobre são limitadas e em processo de exaustão. Por sua vez, a sílica, o material utilizado para o fabrico das fibras, é de fácil obtenção podendo, por exemplo, ser encontrado na areia.
- Grande confiabilidade: As informações transmitidas no que respeita ao sigilo são completamente seguras pois o desvio de sinais óticos causa danos ao sistema.
- Níveis de potência extremamente baixos: O menor consumo de energia dos equipamentos é conseguido pelos baixos níveis de potência utilizados em comunicações óticas.

Apesar do grande número de vantagens que a fibra ótica apresenta, existem igualmente desvantagens que interessa salientar:

- Dificuldade no acoplamento e emenda da fibra ótica: Há que ter um certo cuidado aquando da emenda e conexão das fibras, um erro no processo pode trazer perdas de grande parte da potência ótica. São utilizados equipamento e ferramentas de elevada precisão para tal processo.
- Derivações limitadas: Existem limitações no número de derivações passivas visto os componentes (acopladores) utilizados para este fim atenuam o sinal.

- Fragilidade: Quando a fibra ótica é manuseada sem proteção mecânica (revestimento) é mais fácil de quebrar comparativamente aos meios de comunicação convencional (cabos metálicos).

3.3 Redes de Bragg

As redes de Bragg possuem inúmeras contribuições para a resolução revolucionária dos problemas da monitorização estrutural.

3.3.1 Princípio de funcionamento das Redes de Bragg

As redes de Bragg são consideradas elementos simples, que são confinados ao núcleo de uma fibra ótica e com um elevado potencial de produção em massa. A possibilidade de se poder fabricar redes de Bragg por processos fotolíticos, que não põem em risco a integridade física e as próprias características das fibras, revelou-se nos últimos anos como um dos mais rentáveis campos de estudo e investigação científica na área da optoelectrónica.

Uma rede de Bragg é essencialmente uma microestrutura de dimensões reduzidas ($\sim 1\mu\text{m}$) que é inscrita no interior de uma fibra ótica ($\phi_{\text{núcleo}} \approx 10\mu\text{m}$, $\phi_{\text{fibra}} \approx 125\mu\text{m}$) por métodos diversos utilizando radiação UV coerente, ou seja, emitida por um laser. Esta microestrutura diz respeito, essencialmente a uma pequena alteração da periodicidade e do índice de refração (na ordem dos 0.1%), que tem origem num mecanismo físico chamado de fotossensibilidade, especialmente observável em fibras de sílica que possuam grandes dopagens de germânio ou em fibras óticas standard quando submetidas com hidrogénio a altas pressões (Araújo, 2000).

A fotossensibilidade é o mecanismo pelo qual se fabricam as microestruturas nas fibras óticas, no seu núcleo, através de uma exposição transversal a padrões periódicos de radiação UV. Cada elemento individual da microestrutura é formado por irradiação pontual no núcleo da fibra, a qual provoca uma alteração do índice de refração comparativamente às regiões

vizinhas não iluminadas. A fotossensibilidade é então um mecanismo não-linear responsável pela fotoindução de alterações permanentes do índice de refração e está associado a centros presentes na matriz da sílica dopada com germânio que constitui o núcleo das fibras óticas fotossensíveis.

A máscara de fase, demonstrada na Figura 26, é um dos processos mais utilizados nas escritas das redes de Bragg (utilizada na FiberSensing) em fibra ótica. É uma rede de difrações utilizada em transmissão que conduz à formação de um padrão de interferência, o que torna possível a fabricação das redes de Bragg. É considerada uma máscara ideal quando o período da modelação do padrão de interferência é sempre metade do período da máscara de fase. É de referir que o fabrico de redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda centrais é conseguido através de diferentes períodos da máscara de fase ou por diferentes tensões aplicadas na fibra.

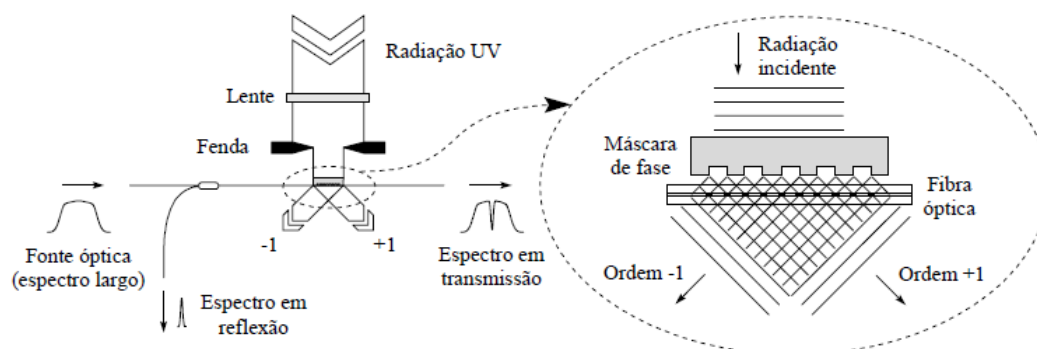


Figura 26 – Fabricação de uma rede de Bragg pelo método da máscara de fase (Araújo, 2000).

Quando a máscara de fase é iluminada perpendicularmente com um feixe de radiação ultravioleta, as ondas correspondentes às duas ordens de difração eficientes interferem logo após a máscara originando franjas de interferência de elevada visibilidade. A sobreposição dos feixes transmitidos correspondentes às ordens +1 e -1 de difração, na proximidade da superfície da máscara de fase, conduz à formação de um padrão de interferência, que torna possível a fabricação das redes de Bragg.

O fenómeno do espalhamento da luz acontece aquando da incidência da luz proveniente de uma fonte de espectro largo é guiado pela fibra com a rede de difração (rede de Bragg). Simplificadamente pode afirmar-se que para cada rede corresponde um certo comprimento de onda para o qual é satisfeita uma condição de ressonância em que as ondas geradas em cada plano estão em fase, facto que origina uma reflexão de forte nível. Este comprimento de onda, denominado de comprimento de onda de Bragg, λ_B , e a sua dependência no período da rede de difração, Λ_B , é dada por:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda_B$$

Onde n_{ef} é o índice de refração efetivo do núcleo.

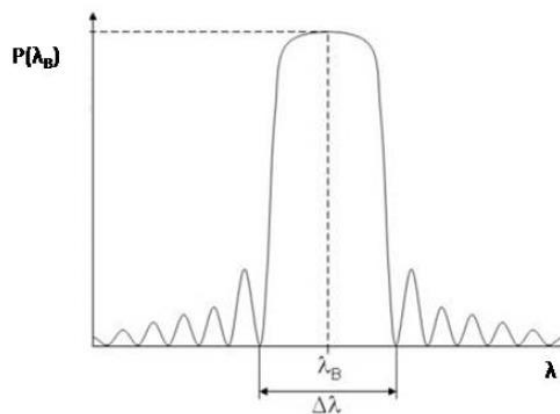


Figura 27 - Potência refletida em função do comprimento de onda (Marques, 2008)

A reflexão da luz propagada ao longo da fibra ocorre numa restrita gama de comprimentos de onda (Figura 27), na qual as condições de Bragg são satisfeitas. Os restantes comprimentos de onda não são afetados pela rede. Excetuam-se os lobos laterais que mais frequentemente ocorrem nos espectros de reflexão e que podem ser suprimidos por um processo denominado de apodização. Na zona espectral correspondente ao comprimento de onda de Bragg (Figura 28) é suficiente uma modulação do índice de refração relativamente

pequena de forma a conseguir elevada refletividade, caso o comprimento de rede for suficientemente longo.

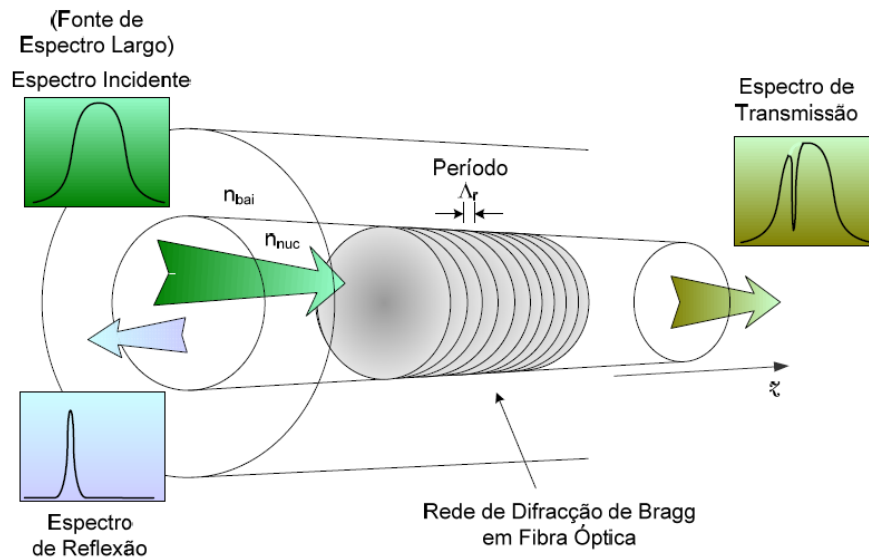


Figura 28 - Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma rede em Bragg de uma fibra de ótica (Alves, 2007)

3.3.2 Características das redes de Bragg

As redes de Bragg não conseguirem competir com outras soluções existentes em termos de preço, podem providenciar qualidades elevadas que as tornam bastante adequadas para aplicações especiais:

- Combinam perfeitamente com novos materiais compósitos como vidro ou fibra de carbono reforçada com compósitos que são utilizados nas novas construções, como aviões ou torres eólicas. *Fiber Bragg grating* (FBG) podem ser integradas diretamente em compósitos ou então fixos diretamente na superfície do equipamento em estudo como sensores de tensão;

- Têm a capacidade de medir deformações elevadas, superiores a 10,000 $\mu\text{m}/\text{m}$ e são por isso bastante aconselháveis para construções em compósitos sujeitos a elevadas tensões;
- Possuem pequenas dimensões e peso bastante reduzido;
- São imunes a interferências eletromagnéticas;
- Os sinais dos FBG são intrinsecamente passivos (não existe a necessidade de energia elétrica), podem então ser posicionadas áreas de grande voltagem ou potencialmente explosivas;
- O sinal dos FBG não é dependente da distância (10 Km em média por sensor, dependendo da potência dos interrogadores);
- Numa só fibra podem coexistir vários FBG (mais de vinte, e com a evolução da tecnologia dos interrogadores podem ir até 100 o número de FBG);
- A estabilidade a longo prazo é bastante elevada;
- Boa resistência à corrosão;
- Versões especiais de FBG podem ser utilizadas a temperaturas elevadas (superiores aos 700°C);
- Fácil instalação.

Contudo as redes de Bragg apresentam também algumas desvantagens, igualmente mencionadas:

- Os FBG apresentam uma grande dependência da temperatura (a relação de $\Delta\lambda/\lambda_B$ causado por 1°C é equivalente a $\Delta\lambda/\lambda_0$ causado por 8 $\mu\text{m}/\text{m}$ em termos de deformação mecânica).

- Os FBG não conseguem providenciar uma auto capacidade de compensação de tensões aparentes. As compensações de temperatura têm que ser realizadas por canais de medição de temperaturas separados e os seus correspondentes cálculos.
- Apresentam uma elevada sensibilidade a forças laterais ou a pressões causadas. O coeficiente de refração torna-se diferente de 0° e de 90° do eixo de coeficiente polarizado, resultando dois diferentes picos refletidos.
- Os instrumentos de interrogação para sensores de Bragg são ainda caros. Contudo com um grande número de sensores por interrogador o custo por canal em termos de instalação consegue ser inferior ao convencionais.

3.3.3 Aplicações

Como já é sabido as redes de Bragg têm uma ampla gama de aplicações rentáveis, contudo é na monitorização que esta tecnologia se torna notável mais concretamente nas seguintes áreas: engenharia civil e geotecnia, indústria aeronáutica, indústria petrolífera, indústria automóvel, redes de energia, ambiente, engenharia naval, parques eólicos, medicina, indústria química, etc.. É quando comparada à tecnologia convencional de base elétrica que esta tecnologia mais se evidencia. Os sensores convencionais apresentam uma série de desvantagens como a sensibilidade a ruído eletromagnético, uma elevada suscetibilidade a perturbações ambientais, e a dependência do estímulo elétrico.

Destaca-se a área dos sensores embebidos em materiais compósitos para o desenvolvimento de estruturas inteligentes. Visto os sensores de Bragg terem reduzidas dimensões permitem a sua inclusão no próprio material compósito sem nunca comprometer a integridade da estrutura, permitindo uma monitorização em tempo real sobre o desempenho da mesma.

As características particulares dos sensores baseados em redes de Bragg colmatam as deficiências apresentadas em termos de desempenho dos sensores mais convencionais. Os sensores baseados em redes de Bragg constituem, por estes motivos, uma solução com um enorme potencial de corresponder à exigência da monitorização em tempo real do ajuste dos diversos parâmetros da estrutura; durante os ensaios de carga, de modo a aferir e certificar a entrada em operação da obra; e durante o tempo de serviço da obra de arte, possibilitando desta forma o diagnóstico da estrutura e consequente identificação da necessidade de intervenções preventivas.

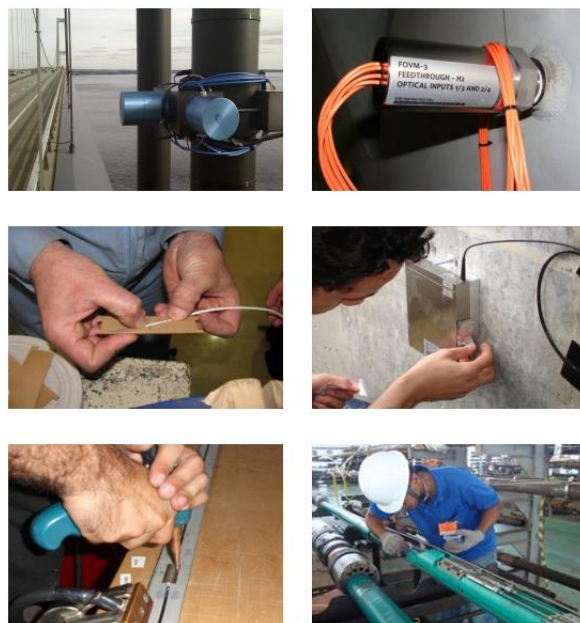


Figura 29 - Exemplos de sensores de Bragg utilizados na Engenharia Civil (FiberSensing, 2014)

Na Figura 29 encontram-se alguns sensores baseados na tecnologia das redes de Bragg. Com recurso a este tipo de instrumentação é hoje possível medir, apenas com uma fibra ótica, várias grandezas como deslocamento, temperatura ou deformação.

3.3.4 Redes de Bragg como sensores

A utilização de redes Bragg como elemento sensor permite associar todas as propriedades que são comuns aos sensores de fibra ótica à codificação inerente em comprimento de onda.

Em termos de propriedades das redes de Bragg são de referir as seguintes:

- Imunidade a interferências eletromagnéticas;
- Eletricamente passivos;
- Dimensões e peso reduzidos;
- Capacidade de multiplexagem;
- Codificação inerente em comprimento de onda.

Visto a informação se encontrar codificada num parâmetro absoluto, o comprimento de onda, a realização de medições torna-se insensível a variação da potência ótica. A natureza ressonante da resposta espectral das redes de Bragg é especialmente atraente para aplicações de multiplexagem do comprimento de onda. Esta característica pode ser convenientemente explorada numa única fibra ótica contendo diversos elementos sensores. É assim possível, ao longo da fibra, associar cada sensor a uma determinada posição constituindo em conjunto um sensor quase-distribuído de deformação ou temperatura. A multiplexagem inerente às redes de Bragg e sua autorreferenciação são apontadas como as principais vantagens associadas aos sensores baseados nesta tecnologia.

As redes de Bragg, sendo parte integrante das fibras óticas, são sensíveis à aplicação de grandezas físicas. Foi descoberta, relativamente cedo, a dependência das propriedades espectrais das redes de Bragg de grandezas, como a temperatura e a deformação mecânica. Significa isto que a aplicação de qualquer uma destas grandezas traduz-se por um desvio do

comprimento de onda induzido pelas alterações do índice efetivo ou do período. Têm-se então, considerando a relação de Bragg na sua forma diferencial, que:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{\Delta n_{cfc}}{n_{cfc}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right)$$

O princípio básico das redes de Bragg passa então pela medição e análise das variações do comprimento de onda induzidas na condição de ressonância por variação de temperatura, de deformação mecânica, de pressão ou de campos magnéticos. No entanto, é nos dois primeiros que está centrada a aplicação desta tecnologia.

3.3.5 Sensibilidade dos sensores

Tal como ocorre em todos os sensores de fibra ótica, os sensores de Bragg são intrinsecamente sensíveis à temperatura, às deformações axiais e transversais, à pressão e, em situações particulares, ao campo magnético. Por este motivo, referindo-se mais em concreto a sensibilidade à deformação axial, é que os sensores de Bragg são utilizados na medição de várias grandezas físicas.

3.3.5.1 Sensibilidade à Temperatura

A dependência de um sensor de Bragg na temperatura, T, pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha + \varsigma) \Delta T = \beta_T \Delta T$$

Onde:

β_T - Coeficiente de sensibilidade térmica do sensor de Bragg

α - Coeficiente de expansão térmica da fibra

ζ – Coeficiente termo-ótico que estabelece a dependência entre o índice de refração efetivo e a temperatura.

No que diz respeito ao coeficiente de expansão térmica, α , a contribuição essencial vem do coeficiente de expansão térmica da sílica pura e adota um valor de $\alpha=0.55 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. O coeficiente termo-ótico depende ligeiramente do comprimento de onda e da temperatura. Para comprimentos de onda na região do infravermelho e temperaturas até 200°C , um valor típico será $\zeta=5.77 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ (valor experimental utilizado pela FiberSensing). Pode ver-se que a contribuição do coeficiente de expansão térmica para o coeficiente de sensibilidade térmica do sensor de Bragg é cerca de doze vezes menor do que a contribuição do coeficiente termo-ótico, o que é verdade para a maioria das fibras.

3.3.5.2 Sensibilidade à deformação mecânica

Quando é aplicada a uma rede de Bragg tensão mecânica axial, ocorre uma alteração da periodicidade da rede e uma alteração do seu índice de refração devido ao efeito fotoelástico. Por conseguinte, de modo análogo ao caso da temperatura, a dependência na deformação expressa à custa da variação relativa de comprimento, isto é, à custa da deformação, $\Delta\epsilon=\Delta l/l=\Delta\Lambda/\Lambda$, pode ser calculada através de:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{\text{ef}}\Lambda)}{n_{\text{ef}}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{\text{ef}}} \frac{\partial n_{\text{ef}}}{\partial \epsilon}\right) \Delta\epsilon = (1 + p_e)\Delta\epsilon = \beta_{\epsilon}\Delta\epsilon$$

Onde:

p_e – Constante fotoelástica da sílica ($p_e \approx 0.22$)

β_{ϵ} – sensibilidade do sensor de Bragg à deformação

A dependência da constante fotoelástica no comprimento de onda é praticamente desprezável, o que permite a obtenção de relações lineares entre o comprimento de onda de Bragg e a deformação mesmo em gamas de deformação da ordem dos 3%, isto é, 30 mε.

3.4 Elementos constituintes de um sistema de monitorização em fibra ótica

3.4.1 Sensores e transdutores

O constituinte que apresenta a sensibilidade intrínseca a certas grandezas externas, graças às alterações provocadas à luz que percorre o núcleo da fibra, e que permite a capacidade de monitorização é o sensor. A colocação dos sensores em estruturas passa por integrá-los em transdutores com o objetivo de traduzir a grandeza física responsável pela mudança das características da luz numa grandeza adequada ao elemento sensor que o constitui.

Encontram-se hoje em dia várias soluções disponíveis de transdutores dependentemente da grandeza a medir, seja ela deformação (Figura 30), temperatura, pressão, deslocamentos, aceleração, ou forças. Estes transdutores devem também ter em conta outros fatores, não só em termos de parâmetros a medir mas também de instalação ou de aspetos metroológicos (medida, resolução, precisão, sensibilidade e erros de medição afetos ao transdutor).

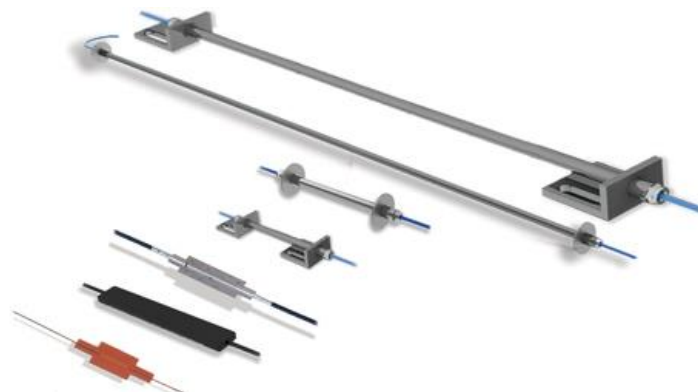


Figura 30 – Sensores de Deformação – “FS6200. FiberSensing”

3.4.2 Unidades de leitura (MU – Measurement Unit)

Existe uma necessidade de combinar uma fonte de luz com um fotodetector, com o objetivo de iluminar o sensor e ao mesmo tempo de avaliar as propriedades da luz moduladas pelo sensor. A fonte de luz tem como função iluminar o sensor através de um espectro de luz apropriado à tecnologia ótica em causa. Por sua vez, o fotodetector (Figura 31) tem como utilidade receber o sinal de luz que é refletido pelo sensor e de o processar de modo a transformar o sinal em informação pretendida.



Figura 31 – Exemplo de uma unidade de medida desenvolvida e produzida na FiberSensing – “FS2100 | FS2200 • Industrial BraggMETER”

Existem diferentes tipos disponíveis de luz que podem ser inseridas e transmitidas pelas fibras óticas, e a suas propriedades estão relacionadas com a tecnologia ótica utilizada nos sensores. O comprimento de onda, ou a banda de comprimentos de onda iluminada, depende também dessa mesma tecnologia, do tipo de fibra utilizado e dos esquemas de multiplexagem previstos. A combinação das características do fotodetector determina também algumas das propriedades da fonte ótica, nomeadamente a sua largura espectral.

3.4.3 Fibra ótica

Adequadamente às redes de sensores deve-se optar pelas fibras óticas que apresentem as propriedades mais adequadas. Deve ser assegurada uma compatibilidade entre a fibra de rede com as características óticas e geométricas da fibra utilizada no fabrico dos sensores e dos demais equipamentos. São disponíveis no mercado diferentes soluções monomodo e multimodo de fibra ótica já mencionadas anteriormente neste capítulo.

3.4.4 Cabo ótico

Os cabos óticos, apresentados Figura 32, têm como função proteger a fibra ótica devido a sua vulnerabilidade contra ataques químicos e mecânicos. O tipo de cabo a utilizar irá depender das condições a que a fibra irá estar sujeita em termos de ambientes agressivos. Um ponto importante para a segurança da instalação do sistema é o de avaliar a curvatura mínima e a força de tração máxima que o cabo deve suportar visto a quebra de um durante a instalação implicar muitas vezes a sua substituição integral.



Figura 32 – Cabos óticos utilizados pela FiberSensing

3.4.5 Conexões / Emendas

A conexão entre os sensores FBG pode ser realizada por duas diferentes maneiras: por fusão das fibras (*splices*) ou a partir de conectores. A emenda entre duas fibras é necessária quando se pretenda uma transmissão de sinais entre elas.

3.4.5.1 Conexão por splice

Este tipo de conexão, por *splice*, é uma fusão permanente entre duas fibras. A respetiva proteção da fusão deve ser realizada conforme as condições a que irá estar sujeito ou de acordo com o tempo de vida desejado.

Estas conexões são bastante estáveis ao longo do tempo e asseguram uma mínima perda de sinais. Esta solução de conexão é então especialmente aconselhada para aplicações permanentes. Este tipo de emenda tem, na maioria dos casos, menos perdas comparativamente aos conectores. Faz parte do processo da conexão de fibras por *splice* a utilização de uma máquina de fusão (Figura 33) por mão-de-obra especializada. A utilização desta técnica torna a conexão um pouco mais demorada.



Figura 33 - Máquina de fusão para união de fibras

Deve-se em primeiro lugar remover as proteções da fibra, em uma banda de alguns centímetros junto a extremidade que se pretende fundir. A união de duas extremidades

oriundas de duas diferentes fibras deve ser realizada quando as duas extremidades estiverem cortadas de forma precisa e de orientação perpendicular ao seu eixo.



Figura 34 - Máquina de corte da fibra ótica

Depois da execução do corte rigorosa da fibra, ambas as extremidades devem ser limpas com álcool para retirar qualquer tipo de impurezas. De seguida a máquina de fusão, apresentada na Figura 34, assume o papel fundamental no processo da fusão, é responsável pelos alinhamentos das duas fibras e pelo processo que permite a fusão das duas fibras através de um arco elétrico, originando um só elemento contínuo.

Existem diferentes máquinas de fusão, que têm como principal diferença a técnica utilizada para o alinhamento das fibras. Algumas realizam esse alinhamento pelas bainhas enquanto outras o fazem pelo núcleo. A escolha da máquina a utilizar na fusão depende essencialmente do grau de exigência pois as diferentes técnicas apresentam diferentes perdas. Apresenta-se na Figura 35 uma conexão de fibras por splice relaziada em obra.



Figura 35 - Exemplo de um Splice realizado por um membro da FiberSensing em obra

3.4.5.2 Conexão por Conectores

A conexão entre sensores através de conectores é uma tarefa mais fácil de realizar que os splices. Por tal motivo, para aplicações de curto espaço de tempo, são a solução mais aconselhável. Por outro lado é mais provável ocorrerem perdas de sinais no sistema e serem menos estáveis ao longo da sua vida. Em termos práticos, permitem uma grande versatilidade e facilidade na sua utilização, visto a conexão poder ser feita e desfeita inúmeras vezes, sem recurso a qualquer equipamento, através de um sistema de alinhamento por aperto mecânico. Os ramos óticos com este tipo de conexão devem ser instalados com poucos sensores por canal.

É necessário ter um especial cuidado na prevenção e eliminação de qualquer tipo de sujidade que possa afetar os conectores, de modo a garantir que estes apresentem desempenhos satisfatórios na conexão.

Para aplicações no exterior estas conceções necessitam igualmente de proteção externa tal como caixas de proteção. Na FiberSensing são utilizados dois tipos de conectores:

- FC/APC
- SC/APC

A classificação dos conectores é de igual padrão às telecomunicações. As duas primeiras letras referem-se ao tipo de ligação das fibras. Os conectores FC são de enroscar enquanto os conectores SC são de inserir e de clique (Figura 36 à Figura 39). A conexão entre os dois conectores é alinhada através de um adaptador.

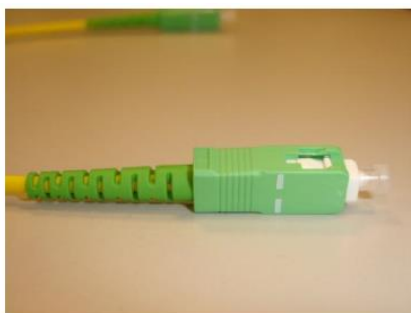


Figura 36 - Conector SC/APC



Figura 37 - Conector FC/APC



Figura 38 - Adaptador SC/APC



Figura 39 - Adaptador FC / APC

É sabido que em função da pressão exercida durante o aperto dos conectores variam as perdas encontradas, recomenda-se então que o aperto seja realizado até começar a surgir resistência, evitando a pressão excessiva que pode igualmente ser prejudicial. Apesar de ser um processo de relativa facilidade este tipo de conexão também apresenta necessidade de monitorizar as perdas para melhorar o desempenho de cada emenda. Apresenta-se na Figura 40 a união de duas fibras por conexão em obra.



Figura 40 - União de duas fibras por conexão realizada por um membro da FiberSensing

3.5 Redes de sensores FBG

Uma rede em FBG (“*Fiber Bragg Grating*”) pode ter várias formas. Contudo existem duas mais comuns, em forma de estrela ou a rede em forma de árvore.

3.5.1 Rede em forma de estrela

A rede em forma de estrela, representada na Figura 41, tem os sensores conectados em série o que significa que toda a unidade de medida é capaz de chegar a todos os sensores, contudo neste formato existem perdas acumuladas.

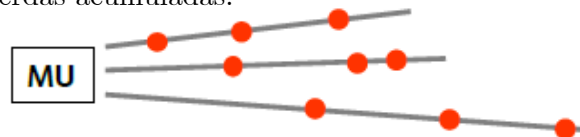


Figura 41 – Exemplo esquemático de uma rede em forma de estrela

3.5.2 Rede em forma de árvore

As redes em forma de árvore (Figura 42) têm uma performance de multiplexação com recurso a *splitters*. Significa assim que a luz incidida na rede pela fonte é dividida sem por isso existir perdas acumulativas, existindo sim perdas de potência na divisão da luz.

Em termos gerais, este formato de rede apresenta-se como versátil quando aplicada às estruturas mais exigentes. Apesar de não tão robusta como a rede em estrela tem a vantagem de caso ocorra uma quebra evitar a perda numerosa de sensores. Contudo, as consequências de qualquer avaria torna-se mais gravosa à medida que a proximidade desta se aproxima da unidade de medição.

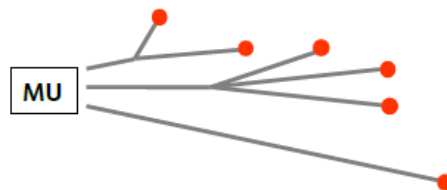


Figura 42 – Exemplo esquemático de uma rede em forma de árvore

4 ShapeSensor - Conceção e Desenvolvimento

4.1 Introdução

A motivação para o desenvolvimento do sensor designado de ShapeSensor surge da vontade de encontrar uma alternativa ao sistema já utilizado na FiberSensing, o SysTunnel, já referido anteriormente. A principal vantagem pretendida com este novo modelo, em comparação com o SysTunnel, passa pelo facto de se procurar ser independente das características do solo envolvente da estrutura do túnel.

O sensor, aqui designado por ShapeSensor, tem como missão final o cálculo das convergências de um túnel. Na sua conceção o sensor tem a capacidade de auto compensar variações de temperatura, facto que permite que possíveis variações de temperatura não interfiram na obtenção dos valores de convergências. É também pretendido do sistema que a medição das convergências seja realizada em tempo real, que o sistema seja de fácil aplicação e que não necessite de inspeções frequentes ao seu funcionamento.

Durante este capítulo será explicado o funcionamento e conceção do ShapeSensor. É contudo necessário referir que caso aplicado na monitorização de um túnel seria utilizado como sistema (conjunto de sensores). É portanto igualmente importante estudar e perceber o seu funcionamento tanto como sistema como sensor único. O funcionamento e conceção do sensor será descrito ao longo deste capítulo, enquanto que o funcionamento do sistema será aprofundado no Capítulo 6.

4.2 Funcionamento do Sistema de Monitorização

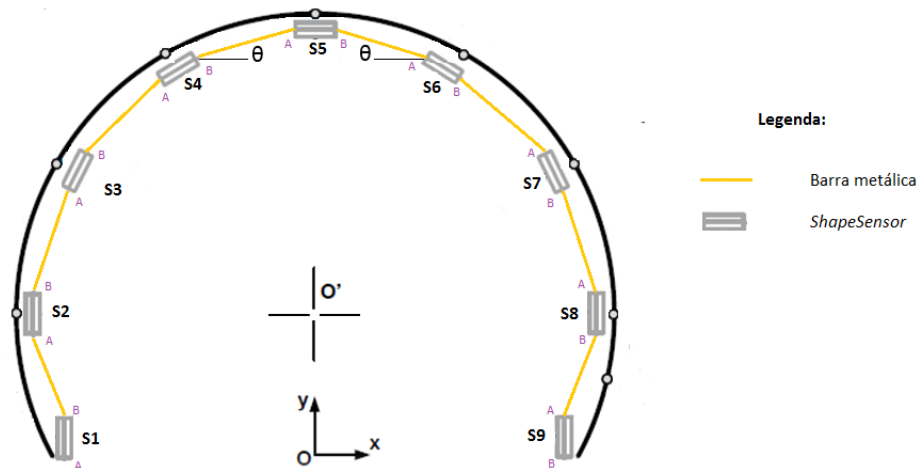


Figura 43 - Exemplo de disposição dos sensores aplicados em uma secção de um túnel

Tomando como exemplo a secção de um túnel ilustrada na Figura 43, onde estão representados 9 ShapeSensors, procurar-se-á explicar o funcionamento do sistema. Note-se que a secção utilizada e a quantidade de sensores utilizados para o caso são apenas exemplificativos. O número de barras metálicas utilizadas na união dos sensores é sempre inferior em um valor ao número utilizado de sensores.

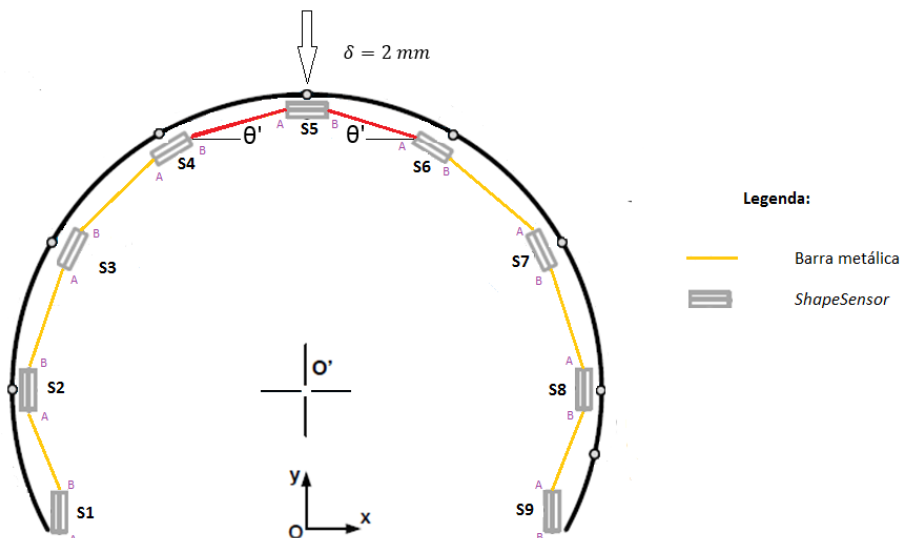


Figura 44 - Exemplo de uma deformação em uma secção de um túnel

O caso apresentado na Figura 44 ilustra a título de exemplo a secção de um túnel com um deslocamento vertical de 2 mm no local do sensor S5. Consequentemente, ocorre um deslocamento vertical no respetivo sensor (S5) de 2 mm, o que provoca que ambas as barras metálicas que se encontram unidas no sensor acompanhem esse movimento. Tendo apenas em atenção o que acontece na barra que une os sensores 4 e 5, e sabendo que o sensor 4 não sofre qualquer deslocamento, a barra metálica irá acompanhar o deslocamento do S5 na extremidade B enquanto que na extremidade A continuará fixa no S4, sofrendo desta maneira uma rotação (θ'). Com base neste princípio procura-se que o sistema, a partir das rotações das barras metálicas provocadas pelos deslocamentos e por recurso a um algoritmo de cálculo, permita a obtenção das convergências na secção.

É de seguida explicado o funcionamento do sensor e a sua conceção que permitirá conhecer a rotação relativa das barras metálicas.

4.3 Funcionamento do Sensor

O sensor desenvolvido será inserido na união de duas barra metálicas, conforme o esquema anterior apresentado, de modo a representar a rotação relativa entre ambas as barras. O respetivo deslocamento relativo será medido com recurso a um eixo cilíndrico na união da barra metálica com o sensor, que permite transmitir as rotações das barras metálicas para uma barra de compósito inserida no interior da assemblagem metálica do sensor. Será nesta barra de compósito que serão colocados dois FBG de forma a medir a deformação imposta.

Instalada no interior do sensor, a barra de compósito encontra-se encastrada numa das suas extremidades enquanto que na outra está livre de rotações. São utilizados dois FBG na barra de compósito que através das extensões sofridas por esta conseguem monitorizar as rotações provenientes da barra metálica originadas por deslocamentos e simultaneamente, funcionando em par, permitirão compensar os efeitos da temperatura.

Depois de delineado o funcionamento estrutural do sensor prosseguiu-se ao desenho do protótipo.

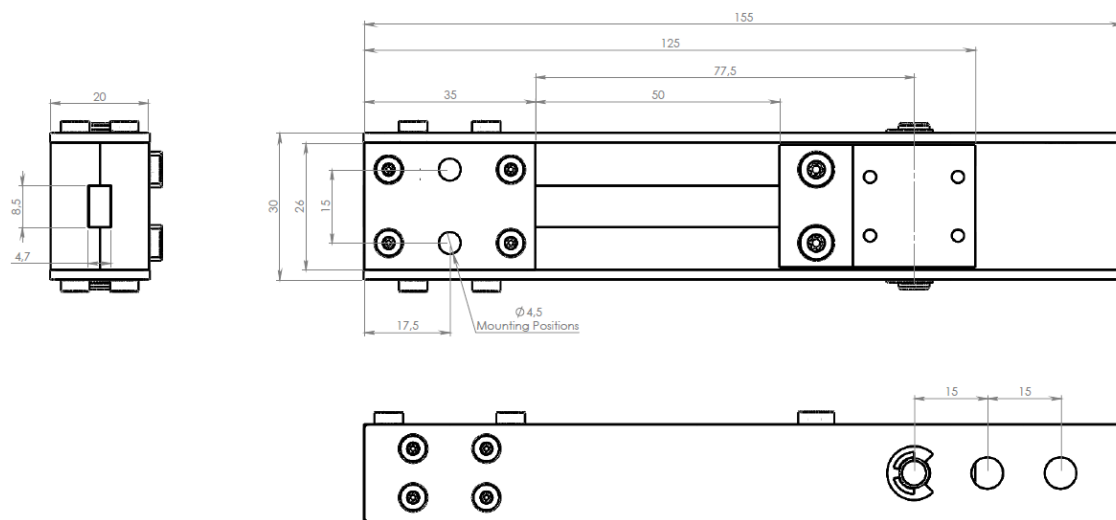


Figura 45 – Desenhos do Protótipo ShapeSensor (dimensões em mm)

Note-se que ao efetuar o desenho da assemblagem metálica do sensor, apresentado na Figura 45, teve-se o cuidado de efectuar diferentes furos, distanciados entre si de 1,5 cm para colocação do eixo cilíndrico de modo a que, em fase de testes, permitir avaliar o comportamento do sensor com diferentes comprimentos da barra de compósito.

Como se pode verificar a barra de compósito estará impedida de qualquer movimento, tanto horizontalmente como verticalmente em ambas as extremidades. A única reação livre será a rotação no apoio do lado do eixo.

Serão utilizados dois FBG no sensor, colados, com recurso a um adesivo químico, na barra de compósito. Note-se que seria necessário a utilização de um FBG para medir as extensões na barra de compósito, contudo não seria possível conhecer as variações de comprimento de onda medidos provenientes de possíveis variações de temperatura. Visto que as extensões na barra de compósito sofridas por acção de variações de temperatura são de igual valor em

ambas as suas faces (superior e inferior), com recurso a dois FBG estas extensões não alteram a diferença da variação de comprimento de onda entre os dois.

4.4 Componentes ShapeSensor

O protótipo do ShapeSensor é então composto pelos seguintes componentes:

a) Barra de compósito

A barra de compósito pode ser considerado como o elemento principal do sensor, responsável por sofrer os efeitos (extensões) lidos pelos FBG.

b) Fibras óticas

As fibras óticas têm como função fazer a transmissão da luz no seu interior tal como acontece em todos os sensores óticos.

c) 2 FBG

A utilização de dois FBG para além da medição da deformação da barra de compósito, tem como objetivo permitir a auto compensação da temperatura dispensando, desta forma, da utilização de um sensor de temperatura no sistema. Os dois FBG deverão ser colados sobre a barra de compósito, em faces opostas, no ponto de maior deformação para maiores sensibilidades.

d) Assemblagem metálica

A assemblagem metálica tem como função imobilizar a barra de compósito de qualquer movimento, possibilitando apenas a transmissão de rotações numa das suas extremidades através da utilização de um eixo cilíndrico (Figura 46).

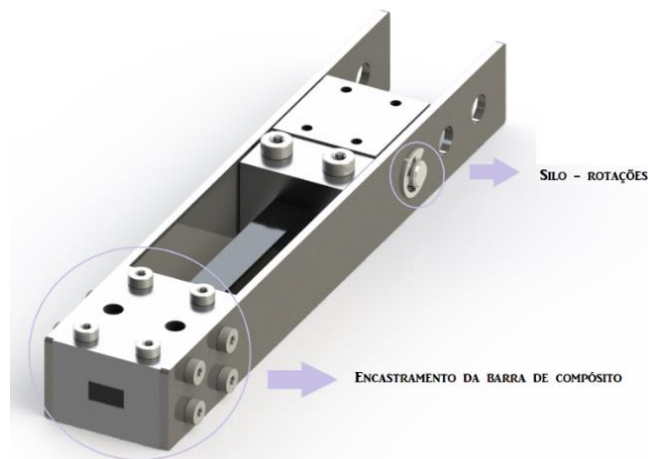


Figura 46 - Representação dos apoios da barra de compósito no ShapeSensor

e) Barra metálica

Tem como função sofrer os deslocamentos num dos seus eixos finais e consequentemente provoca a rotação através do eixo cilíndrico. Esta barra fará a ligação com o nó seguinte do sistema de medição ao longo da secção do túnel.

f) Eixo cilíndrico

Responsável por garantir que apenas rotações são transmitidas à barra de compósito

Depois de delineado o processo de funcionamento do sensor e acabados os seus respectivos desenhos é apresenta na Figura 47 o seu protótipo com todos os seus componentes. . Como se pode comprovar pela sua análise o sensor apresenta a barra metálica na parte direita da imagem, a barra de compósito e o eixo responsável pela transmissão da rotação entre as duas barras.



Figura 47 - Protótipo ShapeSensor

4.5 Dimensionamento da barra de compósito

O compósito foi o material escolhido e aconselhado pela FiberSensing a ser utilizado na barra. Já testado na FiberSensing em outros sensores de deslocamentos, quando comparado com outros materiais como o metal apresenta melhores resultados quando testado sob condições de variações de temperatura. Apresenta igualmente vantagens aquando da colagem dos FBG, e comprovam-se melhores resultados na altura das calibrações dos sensores (menores erros de histerese).

O dimensionamento da barra foi realizado através de cálculos manuais e confirmados com recurso ao *software* de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis*.

Para facilitar o manuseamento posterior na condução dos ensaios de validação, o protótipo será construído com uma barra metálica de 21 cm.



4.5.1 Obtenção da equação de extensões da barra de compósito

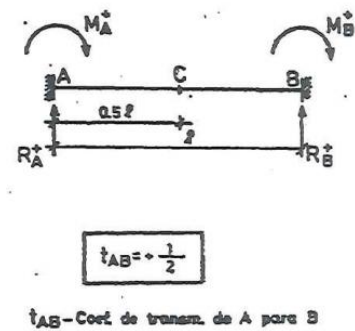
Visto que a medição dos FBG colocados sobre a barra de compósito dependem diretamente da extensão desta, é necessário obter a equação de extensões correspondente da barra de compósito.

Na conceção do sensor, teve-se como objetivo o protótipo possuir uma sensibilidade de 2nm/mm, ou seja, quando aplicado 1 mm de deslocamento na barra metálica ocorrer uma variação no comprimento de onda dos FBG de 2nm.

Para melhor parametrização do comportamento do sensor, e com auxílio das expressões de momentos apresentados no Quadro 2 procedeu-se à quantificação dos respetivos efeitos associados à imposição de um deslocamento unitário na extremidade do mesmo.

Quadro 2 - Viga de momento de inércia constante bi-incastrada (FEUP)

SOLICITAÇÃO	M_A	M_B
	$+\frac{4EI}{l}\phi$	$+\frac{2EI}{l}\phi$
	$+\frac{6EI}{l^2}\Delta$	$+\frac{5EI}{l^2}\Delta$



A equação de extensões da barra de compósito dependerá então dos seguintes parâmetros:

- Comprimento da barra de compósito (l);
- Inércia da secção da barra de compósito (I);
- Distância dos FBG ao eixo de rotação (x);
- Rotação transmitida para a barra de compósito (ϕ);
- Deslocamento associado à barra de compósito derivado do deslocamento da barra metálica (Δ).

Note-se que do final da barra de compósito, representado na Figura 48 com o numero 2, até ao eixo de rotação existe um comprimento de união rígida de 2,7 cm. O dimensionamento da barra de compósito foi realizado impondo um deslocamento virtual unitário no final da barra metálica. Deslocamento este que origina consequentemente uma rotação (ϕ) e um deslocamento (Δ) na barra de compósito. Possuindo a barra metálica um comprimento de 21 cm, e assumindo um deslocamento unitário na barra metálica, os valores de ϕ e Δ serão respetivamente 0.004762 rad e 0.1286 mm.

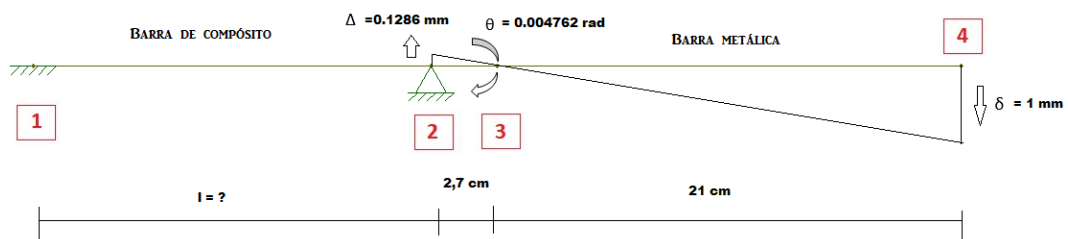


Figura 48 - Esquema estrutural do ShapeSensor

Com recurso ao quadro acima apresentado, os momentos na barra de compósito, tomando em consideração o deslocamento (Figura 50) e a rotação (Figura 49) originados, são os seguintes:

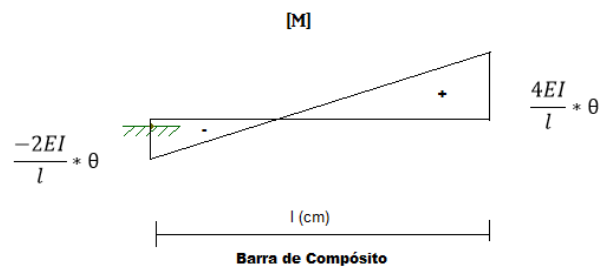


Figura 49 - Momentos na barra de compósito provenientes da rotação

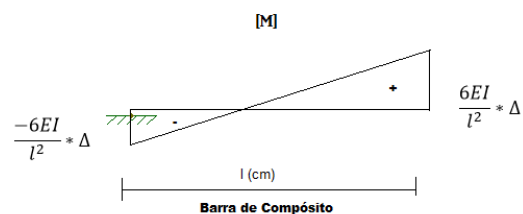


Figura 50 - Momentos na barra de compósito provenientes do deslocamento

Adoptando a equação de momentos da extremidade do eixo de rotação para a extremidade encastrada tem-se que:

$$M(x) = -\frac{4EI}{l}\theta + \frac{6EI}{l^2}\theta * x - \frac{6EI}{l^2}\Delta + \frac{12EI}{l^3}\Delta * x$$

A equação relativa às extensões da barra de compósito referente ao seu esquema estrutural apresenta-se então como

$$\varepsilon(x) = \frac{M}{EI} * Y_G$$

$$\varepsilon(x) = \frac{\left(-\frac{4EI}{l}\theta + \frac{6EI}{l^2}\theta * x - \frac{6EI}{l^2}\Delta + \frac{12EI}{l^3}\Delta * x\right)}{EI} * \frac{h}{2}$$

$$\varepsilon(x) = \left(-\frac{4\theta}{l} + \frac{6\theta}{l^2} * x - \frac{6\Delta}{l^2} + \frac{12\Delta}{l^3} * x\right) * \frac{h}{2}$$

$$\varepsilon(x) = \frac{-2\theta h}{l} + \frac{3\theta h}{l^2} * x - \frac{3\Delta h}{l^2} + \frac{6\Delta h}{l^3} * x$$

$$\boxed{\varepsilon(x) = \frac{h}{l} * \left(-2\theta + \frac{3\theta x}{l} - \frac{3\Delta}{l} + \frac{6\Delta}{l^2} * x\right)}$$

Tendo-se estabelecido a equação de extensões da barra de compósito correspondente ao seu esquema estrutural é de seguida realizado um estudo de mercado referente às secções existentes de barras de compósito. Procura-se-á uma barra que permita obter a sensibilidade anteriormente referida, dentro do campo de funcionamento do sensor e tendo em conta a capacidade de deformação do respetivo material.

4.5.2 Comparação de valores manuais vs Autodesk Robot Structural Analysis

Compara-se de seguida os valores de extensões da barra de compósito calculadas pela equação de extensões e os valores obtidos através do software de cálculo *Robot*. Para tal utilizam-se as dimensões da barra de compósito apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3- Características da barra de compósito utilizadas para comparação de resultados

Características da barra de compósito	
Altura (mm)	4.75
Comprimento (mm)	8
Distância dos FBG ao eixo de rotação (mm)	0

Feita a modelação do esquema estrutural do sensor no programa de cálculo e executando uma análise de tensões na barra de compósito verificam-se os valores apresentados na Figura 51.

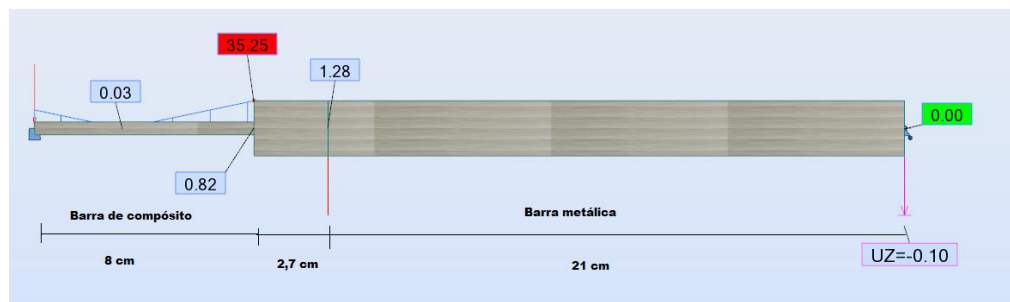


Figura 51 - Dimensionamento da barra de compósito

Analisando o valor apresentado a vermelho (35.25 MPa), referente à tensão no final da barra de compósito (colocação dos FBG a 0 mm do eixo de rotação), obtém-se a respetiva extensão associada:

$$\varepsilon = \frac{\sigma(MPa)}{E(MPa)} = \frac{35.25 * 10^6}{41.4 * 10^6} = 0.8511$$

O valor da extensão obtida, para as mesmas dimensões, a partir da equação de extensões obtidas pelos cálculos manuais é de 0.8517.

Conclui-se que o dimensionamento da barra de compósito realizado através de cálculos manuais é validado.

4.6 Escolha da barra de compósito



Realizou-se um estudo de quais secções comprar, a partir das empresas *Easy Composites* (Quadro 5) e *DragonPlate* (Quadro 6) e. Foi efetuada uma folha de cálculo onde através das secções das barras de compósitas disponibilizadas por ambas as empresas e variando o comprimento da barra e a localização dos FBG obteve-se uma análise de extensões respetivas para cada secção. Relembre-se que se pretendia uma variação de comprimento de onda de cerca de 2 nanómetros em cada FBG para um deslocamento de 5 milímetros numa barra de 1 metro. Visto a barra metálica possuir 21 centímetros para ser atingidos os 2 nanómetros de variação de comprimento de onda em cada FBG seria necessário impor um deslocamento de 1 milímetro.

Apresentam-se nas tabelas em baixo os resultados referentes às extensões para as secções estudadas utilizando um comprimento de barra de 4 centímetros e uma distância dos FBG ao eixo de rotação de 1 centímetro (Quadro 4).


Quadro 4- Características da barra de compósito

Características barra de compósito	
Comprimento barra compósito (cm)	0.04
Rotação angular (radianos)	0.00476187
Distância aos sensores FBG's (m)	0.01
Deslocamento Δ no final da barra (m)	-0.0001286

Quadro 5 - Extensões referentes às secções da Easy Composites

Easy Composites									
									
"Carbon Fibre Strip"					"Carbon Fibre Box Section"				
Unidades de 1m de comprimento					Secção Quadrada de 1m de comprimento				
	Secção	h (mm)	e(x)	Microstrain (µε)		Secções	h (mm)	e(x)	Microstrain (µε)
1)	0.5 mm*3 mm	0.5	0.0001347	134.6721	1)	Secção de 4 mm (Wall Thickness=0.75mm)	4	0.0010774	1077.3765
2)	0.8 mm*3 mm	0.8	0.0002155	215.4753	2)	Secção de 6 mm (Wall Thickness=1mm)	6	0.0016161	1616.06475
3)	1 mm*3 mm	1	0.0002693	269.3441	3)	Secção de 8 mm (Wall Thickness=0.5mm)	8	0.0021548	2154.753
4)	1 mm*4 mm	1	0.0002693	269.3441	4)	Secção de 10 mm (Wall Thickness=1mm)	10	0.0026934	2693.44125
5)	1 mm*6 mm	1	0.0002693	269.3441	5)	Secção de 20 mm (Wall Thickness=1.5mm)	20	0.0053869	5386.8825
6)	0.5 mm*10 mm	0.5	0.0001347	134.6721					
7)	2 mm*12 mm	2	0.0005387	538.6883					
Unidades de 2m Comprimento					Secção quadrada de 2m de comprimento				
	Secção	h (mm)	e(x)	Microstrain (µε)		Secções	h (mm)	e(x)	Microstrain (µε)
1)	0.5 mm*3 mm	0.5	0.0001347	134.6721	1)	Secção de 8 mm (Wall Thickness=0.5mm)	8	0.0021548	2154.7530
2)	0.8 mm*10 mm	0.8	0.0002155	215.4753	2)	Secção de 10 mm (Wall Thickness=1mm)	10	0.0026934	2693.4413
3)	0.8 mm*3 mm	0.8	0.0002155	215.4753	3)	Secção de 20 mm (Wall Thickness=1.5mm)	20	0.0053869	5386.8825
4)	1 mm*3 mm	1	0.0002693	269.3441					
5)	1 mm*4 mm	1	0.0002693	269.3441					
6)	1 mm*6 mm	1	0.0002693	269.3441					
7)	2 mm*12 mm	2	0.0005387	538.6883					

Quadro 6 - Extensões referentes às secções da DragonPlate

DragonPlate					
					
"Carbon Fiber Strip "					
Tiras Rectangulares em Fibra de Carbono					
	Polegadas	mm	h(mm)	ε(x)	Microstrain
1)	0.019"*0.118"*24"	0.48*3*609.6	0.480	0.0001293	129.28518
2)	0.019"*0.118"*48"	0.48*3*1219.2	0.480	0.0001293	129.28518
3)	0.019"*0.590"*24"	0.48*14.99*609.6	0.480	0.0001293	129.28518
4)	0.019"*0.590"*48"	0.48*14.99*1219.2	0.480	0.0001293	129.28518
5)	0.032"*0.310"*24"	0.81*7.87*609.6	0.810	0.0002182	218.168741
6)	0.032"*0.310"*48"	0.81*7.87*1219.2	0.810	0.0002182	218.168741
7)	0.034"*0.121"*24"	0.86*3.07*609.6	0.860	0.0002316	231.635948
8)	0.034"*0.121"*48"	0.86*3.07*1219.2	0.860	0.0002316	231.635948
9)	0.035"*0.106"*24"	0.89*2.69*609.6	0.890	0.0002397	239.716271
10)	0.035"*0.106"*48"	0.89*2.69*1219.2	0.890	0.0002397	239.716271
11)	0.040"*0.166"*24"	1.02*4.22*609.6	1.020	0.0002747	274.731008
12)	0.040"*0.166"*48"	1.02*4.22*1219.2	1.020	0.0002747	274.731008
13)	0.057"*0.177"*24"	1.45*4.50*609.6	1.450	0.0003905	390.548981
14)	0.057"*0.177"*48"	1.45*4.50*1219.2	1.450	0.0003905	390.548981
15)	0.070"*0.437"*24"	1.78*11.10*609.6	1.780	0.0004794	479.432543
16)	0.070"*0.437"*48"	1.78*11.10*1219.2	1.780	0.0004794	479.432543
17)	0.092"*0.220"*24"	2.34*5.59*609.6	2.340	0.0006303	630.265253
18)	0.092"*0.220"*48"	2.34*5.59*1219.2	2.340	0.0006303	630.265253
19)	0.125"*0.325"*24"	3.175*8.26*609.6	3.175	0.0008552	855.167597
20)	0.125"*0.325"*48"	3.175*8.26*1219.2	3.175	0.0008552	855.167597
21)	0.125"*0.500"*24"	3.175*12.7*609.6	3.175	0.0008552	855.167597
22)	0.125"*0.500"*48"	3.175*12.7*1219.2	3.175	0.0008552	855.167597
23)	0.187"*0.325"*24"	4.75*8.26*609.6	4.750	0.0012794	1279.38459
24)	0.187"*0.325"*48"	4.75*8.26*1219.2	4.750	0.0012794	1279.38459
25)	0.196"*0.787"*24"	4.98*19.99*609.6	4.980	0.0013413	1341.33374
26)	0.196"*0.787"*48"	4.98*19.99*1219.2	4.980	0.0013413	1341.33374
27)	0.200"*0.250"*24"	5.08*6.35*609.6	5.080	0.0013683	1368.26816
28)	0.200"*0.250"*48"	5.08*6.35*1219.2	5.080	0.0013683	1368.26816
29)	1.2mm*50mm*24"	1.2*50*609.6	1.200	0.0003232	323.21295
30)	1.2mm*50mm*48"	1.2*50*1219.2	1.200	0.0003232	323.21295
31)	1.2mm*80mm*24"	1.2*80*609.6	1.200	0.0003232	323.21295
32)	1.2mm*80mm*48"	1.2*80*1219.2	1.200	0.0003232	323.21295
33)	1.2mm*100mm*24"	1.2*100*609.6	1.200	0.0003232	323.21295
34)	1.2mm*100mm*48"	1.2*100*1219.2	1.200	0.0003232	323.21295

Foi decidido então realizada a encomenda de três diferentes barras:

- *Easy Composites* – “Carbon Fibre Box Section” – Secção quadrada de 8 milímetros ($\epsilon=2154.75 \mu\epsilon$)
- *DragonPlate* – “Carbon Fibre Strip” – Secção de $4.75 \times 8.26 \text{ mm}^2$ ($\epsilon = 1279.38 \mu\epsilon$)
- *DragonPlate* – “Carbon Fibre Strip” – Secção de $5.08 \times 6.35 \text{ mm}^2$ ($\epsilon = 1368.27 \mu\epsilon$)

Tendo em posse a montagem metálica do sensor e as barras de compósito procedeu-se então à colagem dos FBG.

4.7 Preparação/Colagem dos FBG nas barras de compósito

Foram preparadas, e mais tarde testadas, três diferentes barras:

- 1) *DragonPlate* – “Carbon Fibre Strip” – com uma altura de 4.75 mm e um comprimento de 8 cm. Os FBG foram colados a 2,1 cm do final da barra de compósito (Figura 52).

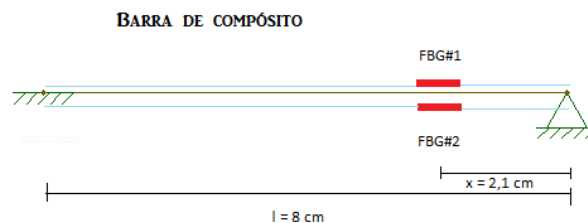


Figura 52- Esquema de colagem dos FBG na 1ª barra

- 2) *DragonPlate* – “Carbon Fibre Strip” – com uma altura de 4.75 mm e um comprimento de 4 cm. Os FBG foram colados a 0,8 cm do final da barra de compósito (Figura 53).

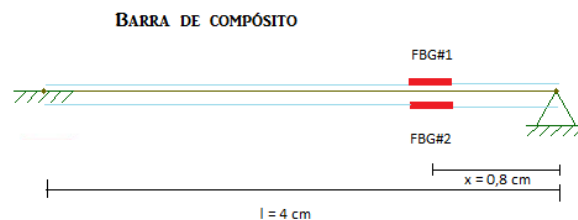


Figura 53 - Esquema de colagem dos FBG na 2ª barra

- 3) *Easy Composites* – “Carbon Fibre Box Section” – Secção quadrada de 8 milímetros, e com comprimento de 4 cm. Os FBG foram colados a 0,8 cm do final da barra de compósito (Figura 54).

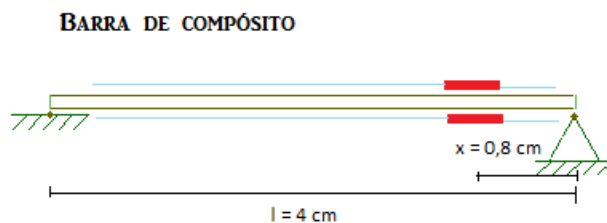


Figura 54 - Esquema de colagem dos FBG na 3ª barra

Para a colagem dos FBG foi utilizada uma cola NP-50 (já utilizada e aconselhada pela FiberSensing), apresentada na Figura 55, e um ativador da cola, com o propósito de acelerar o processo de secagem. A proporção utilizada de ambos os produtos para a preparação da cola foi de 1 gota de ativador por grama de cola utilizada.



Figura 55- Cola NP - 50 utilizada na colagem dos FBG

Foi colado um FBG em cada uma das barras, deixada de seguida a secar durante 24 horas. Cada uma das barras foram fixadas à mesa de trabalho por recurso a fita-cola permitindo assegurar que os FBG eram colados precisamente centrados nas barras de compósito (Figura 56). A cola foi aplicada sobre os FBG com o auxílio de um pincel. O comprimento da janela de colagem utilizado foi igual ao comprimento da janela do Grating. A janela do Grating da

barra de 8 cm tem 3,2 cm enquanto que nas barras de 4 cm foram utilizadas fibras com janelas de 1,2 cm.



Figura 56 - Colagem do 1º FBG na barra de 8 cm

Depois de colado um FBG em cada uma das barras e esperadas 24 horas, foram inseridas no interior de um forno por mais 24 horas (Figura 57), sobre temperaturas de 90°C, de modo a assegurar a total secagem da cola.



Figura 57 - Forno da *memmert* utilizado para a secagem da cola

O processo foi então repetido uma segunda vez para a colagem dos outros FBG colocados sobre as faces opostas das barras de compósito colocadas exactamente na mesma posição. Depois da secagem das 3 barras foram colocadas na assemblagem metálica dando por fim o seu processo de montagem, como se pode comprovar na Figura 58.

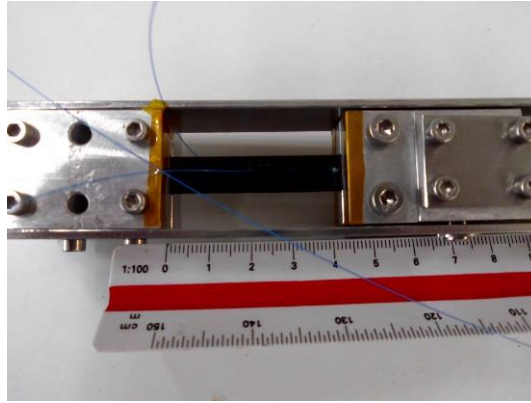


Figura 58 - Barra de compósito com 4 cm colocada na assemblagem metálica

4.8 Sensibilidade teórica do protótipo

Com base na expressão de extensões característica da barra de compósito do ShapeSensor e fazendo variar o deslocamento imposto no final da barra de compósito são apresentados os valores teóricos da sensibilidade de cada uma das barras preparadas para testes. De modo a obter as variações de comprimento de onda dos FBG em relação aos deslocamentos utilizou-se a seguinte relação entre extensão e comprimento de onda:

$$1\mu\epsilon \approx 1.2 \text{ pm (picómetro)} = 1.2 * 10^{-3} \text{ nm (nanómetro)}$$

- 1) *DragonPlate* – “Carbon Fibre Strip” – 8 cm de comprimento

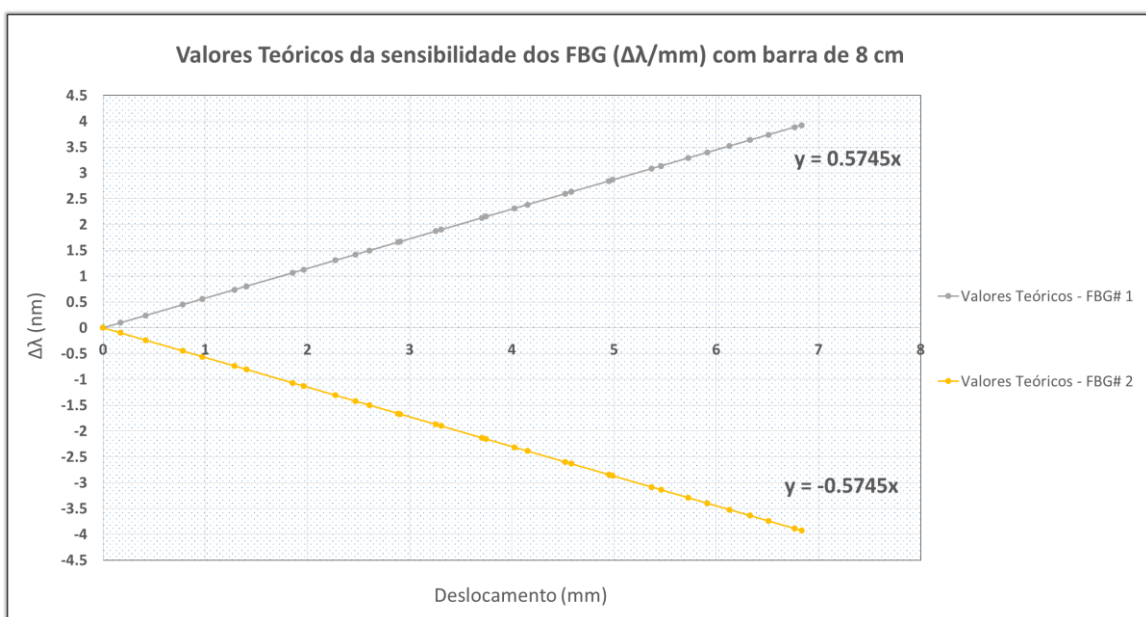


Figura 59 - Valores teóricos da 1ª barra

É esperado que os FBG aplicados na barra de compósito de 8 centímetros de comprimento e com uma altura de 4,75 milímetros consigam uma variação de 0,5nm quando realizado um milímetro de deslocamento na barra metálica e 2 nm quando aplicados cerca de 2 mm (Figura 59).

2) *DragonPlate* – “Carbon Fibre Strip” – 4 cm de comprimento

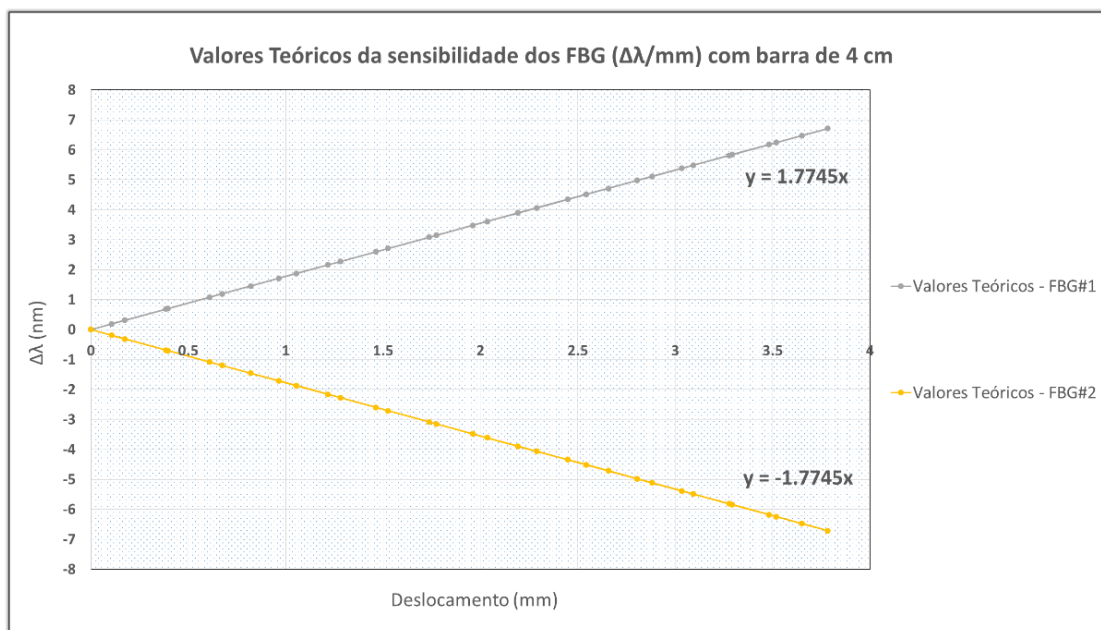


Figura 60 - Valores teóricos da 2ª barra

É esperado que os FBG na barra de compósito de 4 centímetros de comprimento com uma altura de 4,75 milímetros consigam uma variação de comprimento de onda de 0,5nm quando realizado meio milímetro de deslocamento na barra metálica e 2 nm quando aplicados cerca de 1,1 mm (Figura 60).

3) Easy Composites – “Carbon Fibre Box Section” – Secção quadrada de 8 milímetros

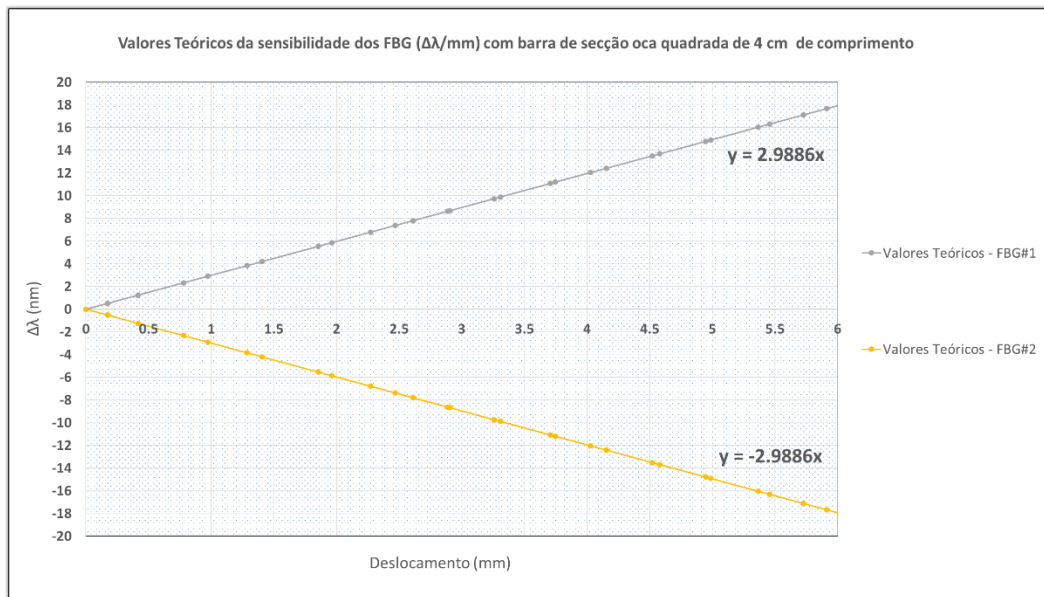


Figura 61 - Valores teóricos da 3ª barra

É esperado que o sensor com uma barra de compósito oca de secção quadrada seja o que apresente maior sensibilidade. Quando aplicado 1 mm de deslocamento é esperada uma variação de comprimento de onda de cerca de 3nm (Figura 61).

5 Testes de calibração do sensor

5.1 Introdução

No âmbito da validação do protótipo apresentado no Capítulo anterior foi planeada e executada uma campanha de vários testes para aferição do seu desempenho em diferentes condições. Estes testes ocorreram em ambientes controlados nos laboratórios da FiberSensing.

A campanha de testes de validação contemplou:

- 1) Teste de deslocamento – com barra de compósito de 8 cm de comprimento.
- 2) Teste de deslocamento – com barra de compósito de 4 cm de comprimento
- 3) Teste de deslocamento – com barra de compósito de secção oca quadrada ($8 \times 8 \text{ mm}^2$)

O ShapeSensor foi submetido a vários patamares de deslocamentos de modo a avaliar o seu comportamento para as diferentes barras de compósito. Para o efeito o sensor foi colocado e fixado a uma mesa com recurso a grampos de modo a garantir a sua imobilidade até ao seu eixo de rotação, ficando assim a barra metálica em suspensão como se pode comprovar na Figura 62. Os deslocamentos foram controlados através de um comparador digital Mitutoyo.



Figura 62 - Fixação do sensor para início de teste de deslocamento

- 4) Ciclos de temperatura – no sensor com barra de 8 cm de comprimento
- 5) Ciclos de temperatura – no sensor com barra de compósito de 4 cm de comprimento e na barra de compósito com 8 cm de comprimento sem assemblagem metálica.
- 6) Ciclos de temperatura – no sensor com barra de 4 cm de comprimento e na barra de compósito com 8 cm de comprimento.



Figura 63 - Sensor Shape com barra de 4 cm, barra de compósito livre e sensor de temperatura no interior da câmara térmica

Para avaliação do comportamento térmico do sensor este foi testado sobre condições de mudança de temperatura. Para cada uma dos três testes de temperatura realizados ao sensor este foi inserido no interior da câmara térmica (Figura 63 e Figura 64), sendo de seguida sujeito ao ciclo de temperatura respetivo.



Figura 64 - Câmara de ciclos térmicos

5.2 Resultados

Adotando o relatório técnico interno desenvolvido e utilizado na FiberSensing, remete-se para o Anexo 1 a descrição detalhada dos respetivos ensaios, bem como os resultados obtidos.

5.3 Conclusões

Do conjunto de ensaios de validação realizados, destacam-se as seguintes considerações relativamente ao desempenho do protótipo:

- O sensor apresenta resultados experimentais não esperados. A sensibilidade do sensor é em grande percentagem inferior ao expectável o que significa que a parte mecânica do sensor pode não representar estruturalmente o projetado teoricamente.
- Os resultados experimentais referentes aos ensaios de deslocamento demonstram que o sensor apresenta erros provenientes de histerese da barra de compósito. A existência de pequenas folgas nas peças metálicas e um menor rigor na aplicação das cargas durante os ensaios explicam esse facto.
- A partir dos testes de temperatura afirma-se, que de forma geral, o sensor apresenta bons resultados quando sujeito a variações de temperatura verificando-se erros de baixo valor.

O erro do sensor é dado pela soma do maior erro encontrado durante os ensaios de deslocamento com o erro respetivo dos testes de temperatura, assim sendo:

Erro (%) ShapeSensor com barra de compósito de 8 cm = 5.264% (deslocamento) + 0.770% (temperatura) = 6.034%

Erro (%) ShapeSensor com barra de compósito de 4 cm = 4.432% (deslocamento) + 0.890% (temperatura) = 5.322%

Os erros obtidos são demasiado elevados para um sensor de deslocamentos.

Indicações para futuros testes ao sensor:

- Realizar os testes de deslocamento com um maior rigor no controlo dos deslocamentos (utilizar cargas mais controláveis).
- Aproximar os FBG o mais possível do eixo de rotação do sensor.
- Quanto maior for a altura da barra maior sensibilidade terá o sensor para um mesmo deslocamento (ter em atenção que maior alturas da barra implicam um aumento na rigidez do conjunto).
- Quanto menor for o comprimento da barra de compósito maior sensibilidade terá o sensor para um mesmo deslocamento (ter em atenção que menores comprimentos da barra implicam um aumento na rigidez do conjunto).
- Alterar, caso seja benéfico e em última opção, o processo mecânico do sensor.

O protótipo do ShapeSensor necessita de melhorias para ser considerado uma opção válida para ser utilizado para monitorização de convergências em túneis.

6 Sistema de medição de convergências em túneis baseado no ShapeSensor

6.1 Introdução

6.1.1 Enquadramento do caso de estudo

No contexto do presente relatório, uma das grandezas que melhor caracterizam o comportamento global dos túneis são as convergências. É pretendido com o novo sensor desenvolvido, o Shapensensor, obter um sistema de monitorização de convergências aplicado em secções de túneis, através da utilização em série de vários sensores.

Visto não ter sido possível durante o tempo de estágio, realizar testes ao sistema em campo, é delineado e apresentado neste Capítulo uma proposta de metodologia do modelo matemático do sistema, para obtenção das convergências da secção monitorizada. Tem-se então como objetivo delinear o processo pelo qual a partir das rotações medidas pelo ShapeSensor encontrar as convergências do túnel.

6.1.2 ShapeSensor na secção do túnel

O sistema, quando aplicado na secção de um túnel sujeito a convergências é necessário que as barras metálicas possuam um mecanismo que as permita variar o seu comprimento. Caso as barra metálicas não consigam variar o seu comprimento, quando sujeitas aos deslocamentos na sua extremidade podem surgir problemas de encurvadura. Para tal é apresentado na Figura 65, uma proposta de solução que permite que as barras consigam transmitir as rotações ao sensor e ao mesmo tempo adaptar-se às variações de comprimento não alterando o seu desenvolvimento rectilíneo.

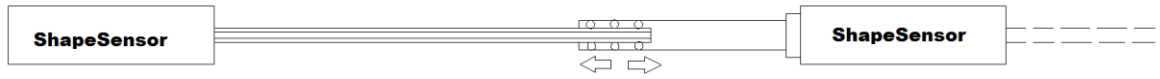


Figura 65 - Proposta de solução na união das barras metálicas

A solução passa por utilizar duas barras metálicas em separado na união de dois sensores, e um mecanismo que permita, que na junção nas barras metálicas, a compensação da variação de comprimento sofrido, utilizando para tal uma abertura numa das barras.

6.2 Metodologia de Cálculo

A metodologia de cálculo estudada passa por obter os deslocamento de pontos através das rotações medidas. Será utilizado um sistema composto por 5 ShapeSensors e 4 barras metálicas para o caso, instalados em uma das secções do túnel do Rossio (com hasteais rectos), apresentado na Figura 66.

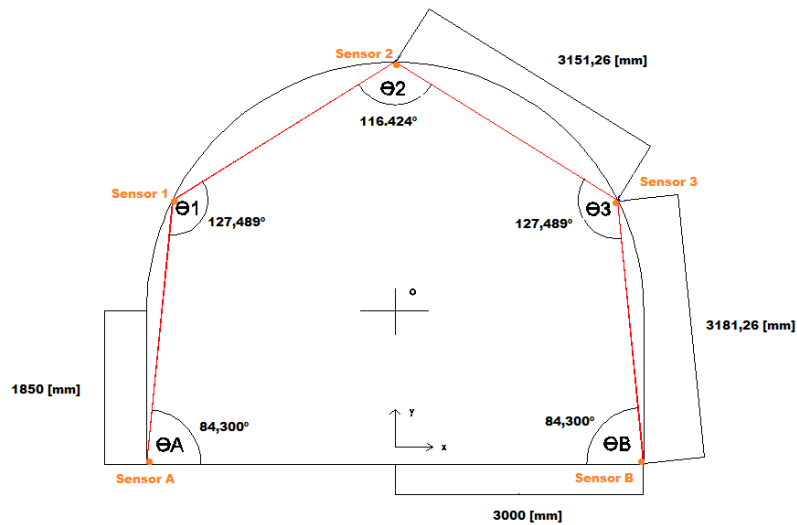


Figura 66 - Sistema com 5 ShapeSensor

Esta metodologia baseia-se no conceito de que qualquer que sejam as variações de ângulos, entre as barras metálicas dos sensores da secção monitorizada, seja possível obter as convergências através da construção de uma matriz denominada de matriz geométrica [K].

Em suma, conhecendo as rotações medidas pelos ShapeSensor, através da matriz geométrica estimam-se os deslocamentos ocorridos para obtenção das convergências.

$$[\theta] = [K] * [\delta]$$

Onde:

- $[\theta]$ – Matriz referente às variações angulares medidas pelos sensor;
- $[K]$ – Matriz geométrica;
- $[\delta]$ – Matriz dos deslocamento a calcular.

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_m \end{bmatrix}; [\theta] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

Neste sistema têm-se, geralmente, mais equações que incógnitas ($n > m$), ou seja mais variações angulares medidas que deslocamentos, sendo necessário resolver o sistema recorrendo ao método dos mínimos quadrados (Rodrigues, Matos, & Henriques, 2012).

É portanto imprescindível conhecer a matriz geométrica para a secção e o numero de sensores utilizados. A matriz geométrica é então composta, para o caso apresentado, por 3 colunas correspondentes aos deslocamentos dos 3 sensores móveis e por 5 linhas referentes às cinco variações de ângulo medidas ($\theta_A, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_B$).

$$[K] = \begin{matrix} & \begin{matrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & K_{1,3} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} \\ K_{3,1} & K_{3,2} & K_{3,3} \\ K_{4,1} & K_{4,2} & K_{4,3} \\ K_{5,1} & K_{5,2} & K_{5,3} \end{bmatrix} & \begin{matrix} \theta_{\mathbf{A}} \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_{\mathbf{B}} \end{matrix} \end{matrix}$$

Onde $K_{1,1}$ representa o valor do deslocamento radial do sensor A para um deslocamento unitário no sensor 1.

Com recurso ao software de desenho *AutoCAD* foram retirados os valores referentes à matriz geométrica impondo deslocamento radiais unitários em cada um dos sensores móveis (sensor 1, 2 e 3).

Na Figura 67 encontra-se representado a secção em estudo com um deslocamento unitário no local do sensor 2 ($\delta_2=1\text{mm}$).

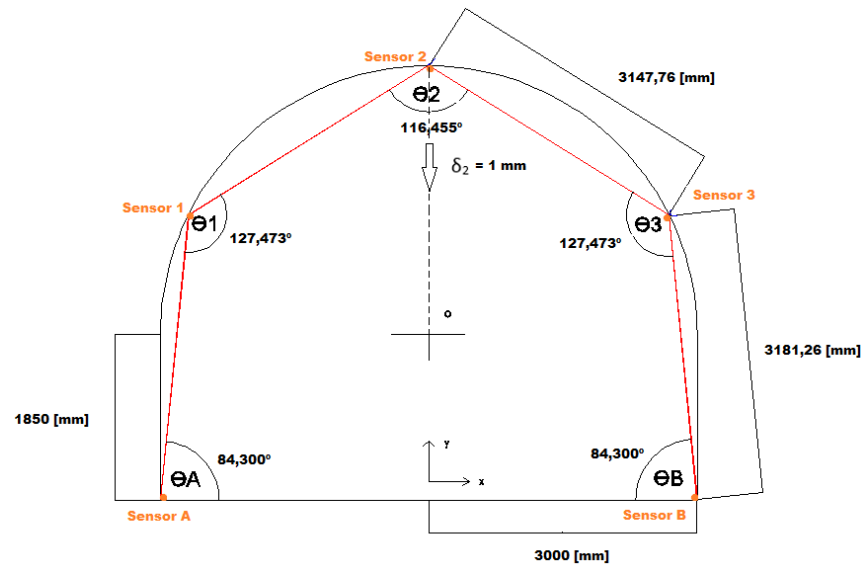


Figura 67 - Rotações medidas com deslocamento unitário no local do sensor 2

Note-se que o comprimento da barra metálica que faz a união do sensor 2 e 3 variou, passando de 3151,26 mm para 3147,76 mm destacando-se outra vez para o estudo do mecanismo, já referido neste Capítulo, que permite com que as barras variem de comprimento sem interferir na sua linearidade.

Foram realizados igualmente os deslocamentos unitário radiais no sensor 1 e no sensor 3, representado na Figura 68 e na Figura 69 respetivamente.

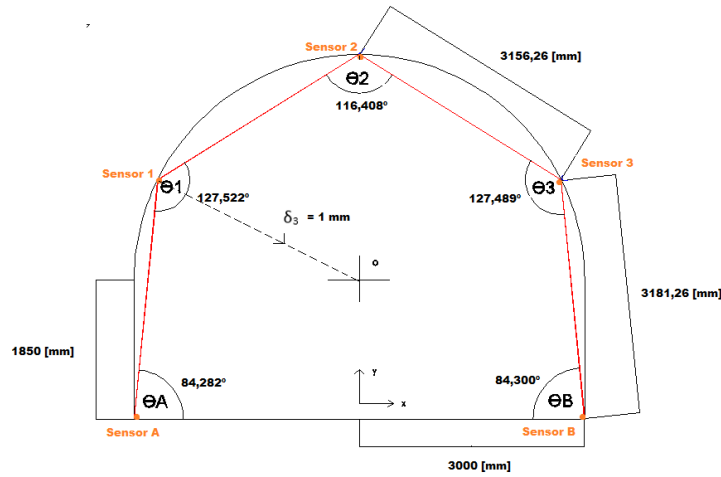


Figura 68 - Rotações medidas com deslocamento unitário no local do sensor 1

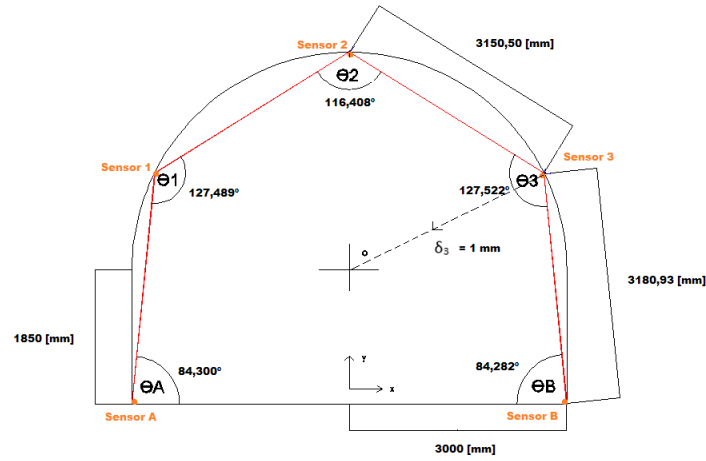


Figura 69 - Rotações medidas com deslocamento unitário no local do sensor 3

Depois de conhecidas as variações dos ângulos formado entre as barras de metálica para cada caso de deslocamento imposto é obtida a matriz geométrica correspondente do sistema:

$$[K] = \begin{bmatrix} -0.008 & 0 & 0 \\ 0.033 & -0.016 & 0 \\ -0.016 & 0.031 & -0.016 \\ 0 & -0.016 & 0.033 \\ 0 & 0 & -0.008 \end{bmatrix}$$

Conhecida a matriz geométrica e as medições das variações angulares consegue-se obter as cinco equações correspondente do método:

$$[\theta] = [K] * [\delta] \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_A = -0.008 * \delta_1 + 0 * \delta_2 + 0 * \delta_3 \\ \theta_1 = 0.033 * \delta_1 + (-0.016) * \delta_2 + 0 * \delta_3 \\ \theta_2 = -0.016 * \delta_1 + 0.031 * \delta_2 + (-0.016) * \delta_3 \\ \theta_3 = 0 * \delta_1 + (-0.016) * \delta_2 + 0.033 * \delta_3 \\ \theta_B = 0 * \delta_1 + 0 * \delta_2 + (-0.008) * \delta_3 \end{cases}$$

Conhecidas as expressões, que têm como incógnitas os deslocamento radiais, é possível a partir de qualquer rotações medidas, para esta secção e para a disposição de sensores apresentada, conhecer os deslocamentos respectivos e assim obter o valor das convergências da secção.

6.3 Conclusão

É apresentado neste Capítulo uma metodologia de cálculo que abrange o principal objectivo do sistema, a obtenção de convergências. A metodologia demonstra ser capaz de estimar deslocamentos a partir de rotações medidas pelos sensores.

Coforme a disposição do sistema (número de sensores e sua localização) e dimensões da secção, será necessário obter uma matriz geométrica correspondente ao caso em estudo. As coordenadas iniciais (sem convergências) da secção monitorizada são obtidas através de meios topográficas, e as coordenadas finais são conseguidas através da obtenção dos deslocamentos ocorridos.

7 Considerações Finais

7.1 Conclusões

Foi realizado como início uma introdução a um dos temas centrais do relatório, a monitorização de convergências em túneis. No Capítulo 1 destacou-se de forma generalizada alguma das vantagens do recurso ao uso de redes de Bragg como sensores enquanto que no Capítulo 2 foi feito um estudo generalizado das soluções existentes para a monitorização de convergências em túneis. Foi igualmente neste Capítulo referido e explicado o sistema actualmente utilizado pela FiberSensing, o SysTunnel, a partir do qual se processou o desenvolvimento do sensor alvo este relatório.

No Capítulo 3 foi abordada a tecnologia da fibra ótica na qual são utilizadas redes de Bragg como elementos sensoriais. Foi descrito o princípio de funcionamento desta tecnologia tais como os elementos constituintes de um sistema de monitorização em fibra ótica.

Ao longo do Capítulo 4 foi apresentado o desenvolvimento do novo sensor baseado na tecnologia de Bragg, com o objetivo da monitorização de convergências em túneis. É descrito o método de funcionamento do sensor e apresentado o dimensionamento da barra de compósito como elemento responsável por sofrer as extensões lidas pelos FBG. Foi igualmente descrito no final deste Capítulo o processo de montagem do sensor.

No Capítulo 5 apresentou-se a campanha de testes de validação realizados ao ShapeSensor. Através dos resultados obtidos pelos ensaios de calibração realizados ao sensor conclui-se que o protótipo não apresenta condições para ser utilizado como solução. O protótipo do ShapeSensor necessita de melhorias para ser considerado uma opção válida na monitorização de convergências em túneis: comprovam-se elevados erros provenientes de histerese da barra de compósito tal como a sensibilidade do sensor se encontrar em grande percentagem inferior

ao expectável. O protótipo apresenta uma rigidez do conjunto elevada que dificultou a imposição de deslocamentos durante os testes de calibração.

No Capítulo 6 foi realizado um estudo do sistema de medição de convergências em túneis baseado no ShapeSensor. É apresentada uma metodologia de cálculo do sensor quando aplicado na secção de um túnel, utilizando-se uma das secções do túnel do Rossio como exemplo prático.

Em suma, procurou-se ao longo deste relatório destacar as vantagens do recurso a sistemas em fibra ótica para monitorização de convergências em túneis. Foi desenvolvido e calibrado um novo sensor que obteve resultados de ensaios pouco satisfatórios levando contudo a acreditar que possui margem para futuros progressos. Realizando uma análise aos objectivos propostos no início do estágio conclui-se que as validações ao sensor em campo não foram, infelizmente, possíveis de concluir.

Como final afirma-se que melhorias futuras realizadas no ShapeSensor podem colocá-lo como uma solução fiável no mercado da monitorização de convergências em túneis.

7.2 Sugestões de desenvolvimentos futuros

Depois de concluídos os estudos em torno do ShapeSensor, apresentados ao longo do relatório, afirmar-se que o sensor apresenta resultados passíveis a que seja continuada o desenvolvimento e melhoria do mesmo. Novos estudos e testes sobre o sensor devem ser realizados de modo a torná-lo como a nova solução perante o SysTunnel e não como uma solução alternativa.

Propõe-se numa fase futura, caso possível, realizar-se uma aplicação real do sistema na secção de um túnel de modo a estudar o novo sistema de forma mais eficiente.

O ShapeSensor pode também ser aplicado na monitorização de outras áreas de Engenharia.

O novo sensor desenvolvido tem a capacidade de funcionar como sensor de deslocamento, podendo ser utilizado, como exemplo, na monitorização de movimento de massas em taludes.

Como futuros estudos e alterações ao ShapeSensor referem-se os principais pontos a trabalhar:

- Melhoria do desenho estrutural do sensor de modo a conseguir-se obter resultados de igual valor tanto teóricos como experimentais;
- Melhoria funcional do sensor que permita com que as fibras óticas consigam entrar e sair da assemblagem metálica de forma rectinilínea o que permitiria que os FBG fossem colados sobre os pontos de maior deformação da barra de compósito;
- Estabelecer e montar um setup para os testes de deslocamento;
- Realizar testes de deslocamento sobre diferentes secções de barras de compósito;

Bibliografia

- Alves, J. (2007). *Monitorização de Estruturas de Engenharia Baseada em Redes de Bragg em Fibra ótica - Contribuição para a Optimização de Dois Sistemas de Interrogação*. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Amaral, M. J. (2006). *Análise dos Resultados de Observação dos Túneis do Metropolitano de Lisboa*. Porto: FEUP.
- Araújo, F. (2000). *Redes de Bragg em Fibra óptica*. Tese de Doutoramento, FCUP, Porto.
- Deere, D., & Deere, D. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, (pp. 91-101). Philadelphia.
- Dinis da Gama, C. (2004). *Novos Desenvolvimentos Sobre o Método Extensométrico para Monitorizar Convergências em Túneis*. Lisboa: IST, Centro de Geotecnia.
- Durham GeoSlope Indicator. (2007). *Basset Convergence System*. Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- FEUP. (s.d.). *Apontamentos de Teoria de Estruturas*. FEUP, Engenharia Civil, Porto.
- FEUP. (s.d.). *Ensaio e Índices de Solos e Terrenos*. Porto.
- FiberSensing. (2013). *SysTunnel - Application Note*.
- FiberSensing. (2014). *Dossier da Empresa*.
- Hecht, E. (2002). *Óptica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- HoeK, E. (2001). Big Tunnels in Bad Rock 2000 Terzaghi Lecture. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (pp. 726-740). Seattle.
- Inaudi, D. (1997). *Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- LNEC. (1980). *Projecto de um convergenciómetro de haste*. Lisboa.
- LNEC. (1984). *Convergenciómetro de fita*. Lisboa.

- Marques, L. (2008). *Optimização de Processos de Produção de Sensores de Bragg em Fibra óptica*. FEUP, Porto.
- Pires, L. (2013). *Caracterização das propriedades ópticas de fibras microestruturadas contendo cristais líquidos*. Porto: FEUP.
- Ribeiro, A. (2009). *Aplicação de Sensores de Fibras ópticas à Observação do Comportamento de Obras Geotécnicas*. Lisboa: FCT/UNL.
- Rodrigues, C. (2001). *Monitorização de Estruturas de Engenharia Civil Apoiada em Soluções de Fibra Óptica*. Porto: FEUP.
- Rodrigues, C., Matos, J., & Henriques, A. (2012). Previsão da deformada dos mastros do Viaduto do Corgo com base nos dados de instrumentação. *Encontro Nacional Betão Estrutural- BE2012*. FEUP.
- S L O P E I N D I C A T O R. (2007). *Bassett Convergence System - Datasheet*.
- Soil Instruments, L. (2007). *Cinta Extensométrica Digital - Datasheet E3*. Obtido de http://www.inmateinsa.com/obracivil/e3_cinta%20converencias.pdf
- Sousa, L. R. (2001). *A Observação no Controlo da Segurança de Obras Subterrâneas em Meio Urbano*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Ucar, R. (2004). *Manual de Anclajes en Ingeniería Civil*. Madrid: Gráficas Arias Montano.
- Wang, I.-T. (1998). *3D-Optical Deformation Measurement And Its Automation Applications In Tunneling*. taiwan.

ANEXOS

ANEXO 1 – Testes de calibração do sensor

QMS Document Name	Internal Development Test Report	Doc Ref: itestr/o.1/xx
QMS Document Description	FiberSensing Internal Development Test Report	
Date	File Name	Pages
26 October 2014	Relatório de Testes ShapeSensor	32
Tip: to ensure correct File name right click and select Update Field		

Test Report Author

Author or Authors

Rui Gaspar

Test Report Application

Department

- | | |
|---|----------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Development | <input type="checkbox"/> Quality |
| <input type="checkbox"/> Engineering | <input type="checkbox"/> Tests |
| <input type="checkbox"/> Production | <input type="checkbox"/> Other: |

Sub Department or Engineering Area

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Hardware | <input type="checkbox"/> Optic |
| <input checked="" type="checkbox"/> Mechanical | <input type="checkbox"/> System Multidisciplinary |
| <input type="checkbox"/> Software | <input type="checkbox"/> Other: |

Tip: to check or uncheck boxes perform double click and select Default Value in Check Box Form Field Options window

Test Report Time Frame

Scheduler, Date or Milestone

2014.05.28

Test Report Scope

Scope, Integration and/or Responsibilities



Testes de deslocamento e temperatura - *ShapeSensor*

Test Sequence Number

Number Description

1	Teste de deslocamento – com barra de compósito de 8 cm de comprimento.
---	--

Test Diagram

Diagram

O *ShapeSensor* foi submetido a vários patamares de deslocamentos de modo a avaliar o seu comportamento. Para o efeito o sensor foi colocado e fixado a uma mesa com recurso a grampos de modo a garantir a sua imobilidade até ao seu eixo de rotação, ficando assim a barra metálica em suspensão como se pode comprovar na Figura 1. Os deslocamentos foram controlados através de um comparador digital *Mitutoyo* (Figura 2).



Figura 2 - Sensor em posição inicial do teste



Figura 1 - Comparador digital e respetivo sistema de suporte *Mitutoyo*



Figura 3 - Esquema básico do sensor com barra de compósito de 8 cm.

O teste foi realizado através de patamares de carga de 0,5 Kg utilizando água como carga. Foi iniciado sem qualquer carga inicial tendo sido alcançado um valor máximo de carga de 8,0 kg, e um deslocamento máximo respetivo de 6,834 mm. De seguida foi igualmente realizada a descarga, com intervalos de igual valor (0,5 Kg), até à sua posição inicial de carga nula.



Figura 4 - Protótipo em ensaio

É de referir contudo que o maior deslocamento medido durante o teste não correspondeu à maior carga exercida, visto que no 1º patamar de descarga foi necessário, para a remoção da água, inserir uma vasilha (objeto utilizado para a colocação e remoção da água, Figura 4) no interior da água para a conseguir retirar, facto que originou um maior deslocamento que não foi recuperado.

Características da Barra de Compósito

Nas figuras 4 e 5 mostram-se alguns pormenores relativos à barra de compósito experimentada neste protótipo. Na imagem estão indicadas as respetivas dimensões.



Características da barra de compósito	
Altura (mm)	4.75
Comprimento (mm)	8
Distância dos FBG ao eixo de rotação (mm)	21

Figura 5 - Imagem da barra de compósito "Carbon Fiber Strip" da empresa *DragonPlate* e respectivas dimensões



Figura 6 - Barra de compósito de comprimento de 8 cm

Ambos os FBG foram ligados à unidade de medição.

A informação foi recolhida em comprimento de onda (nm) para os dois FBG do sensor.



Figura 7 - Unidade de medição

Patamares de deslocamentos efetuados

Na figura 8 representa-se o gráfico com a evolução dos patamares de deslocamento imposto ao longo do tempo do ensaio de carga.

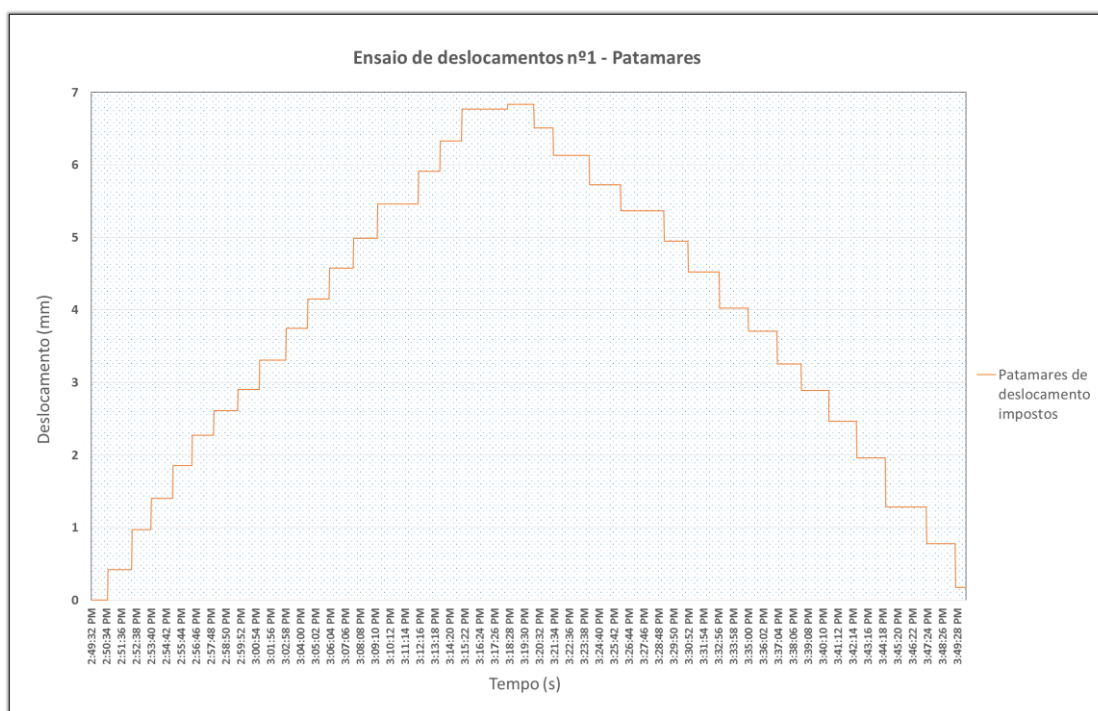


Figura 8 - Deslocamentos medidos pelo comparador digital e respetivas cargas aproximadas

O teste teve a duração de aproximadamente uma hora. Foram realizados 32 patamares de deslocamentos, sendo 16 deles respetivas da carga e os outros 16 da descarga (Quadro 1). Apresentam-se de seguida os resultados obtidos em termos da variação de comprimento de onda. Relembra-se que o sensor teve como objetivo inicial possuir uma sensibilidade, quando sujeito a 1 mm de deslocamento, de 2 nm em termos de variação de comprimento de onda.

Quadro 1 - Deslocamento efetuados no sensor durante o teste, com barra de compósito de 8 cm, e respetivas cargas

Sequência dos patamares de deslocamentos efectuados (mm)	0.000	0.417	0.973	1.405	1.855	2.272	2.609	2.905	3.308	3.746	4.152	4.579	4.986	5.458	5.912	6.327	6.765	6.834	6.510	6.127	5.727	5.366	4.947	4.523	4.026	3.707	3.257	2.888	2.467	1.961	1.285	0.778	0.170
Carga exercida (Kg)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	7.5	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0

Test

Test

Apresentação dos resultados

Na figura abaixo apresentam-se as variações de comprimento de onda de ambos os FBG do sensor durante o mesmo ensaio, em função do tempo.

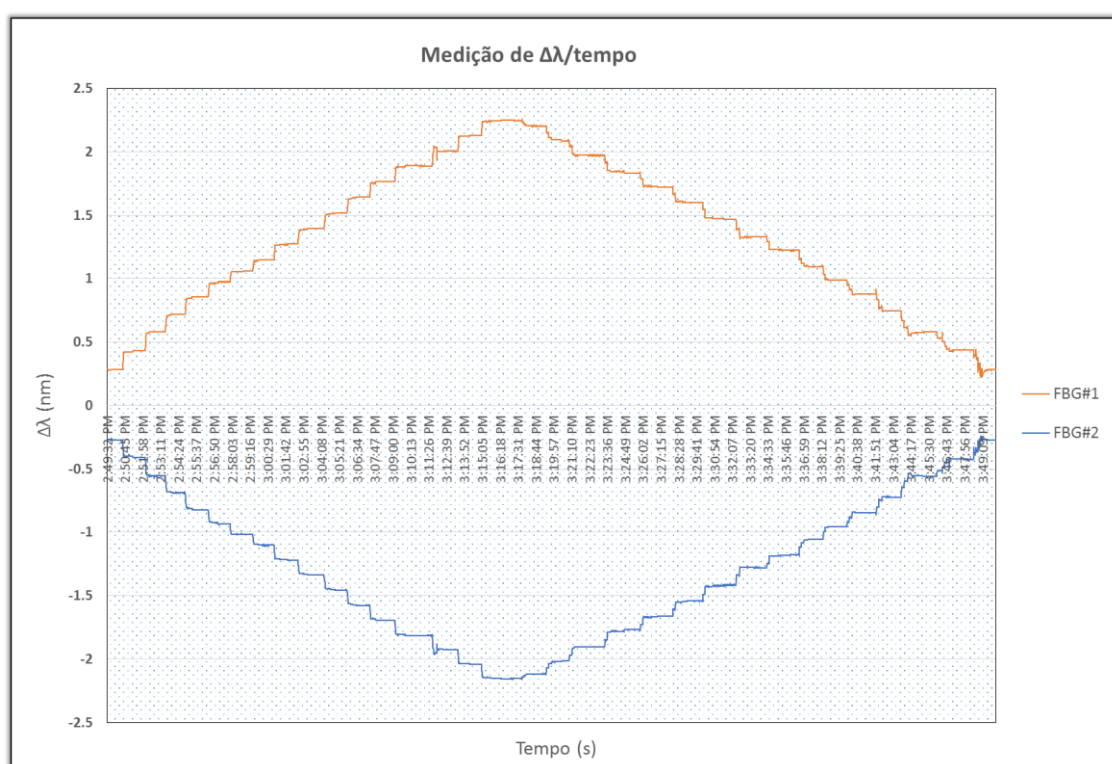


Figura 9- Variação do comprimento de onda dos FBG em função do tempo (1º teste)

A partir dos valores apresentados na Figura 9 podem ser determinados os valores médios de variação de comprimento de onda em cada patamar de deslocamento de cada FBG. Para a obtenção da média de cada patamar foram utilizados pontos equivalentes a 30 segundos do ensaio, ou seja, foram utilizados 30 pontos.

Na figura 10 são apresentados as variações de comprimento de onda médias para cada patamar de deslocamento aplicado. Simultaneamente comparam-se esses valores com a previsão teórica da respectiva resposta.

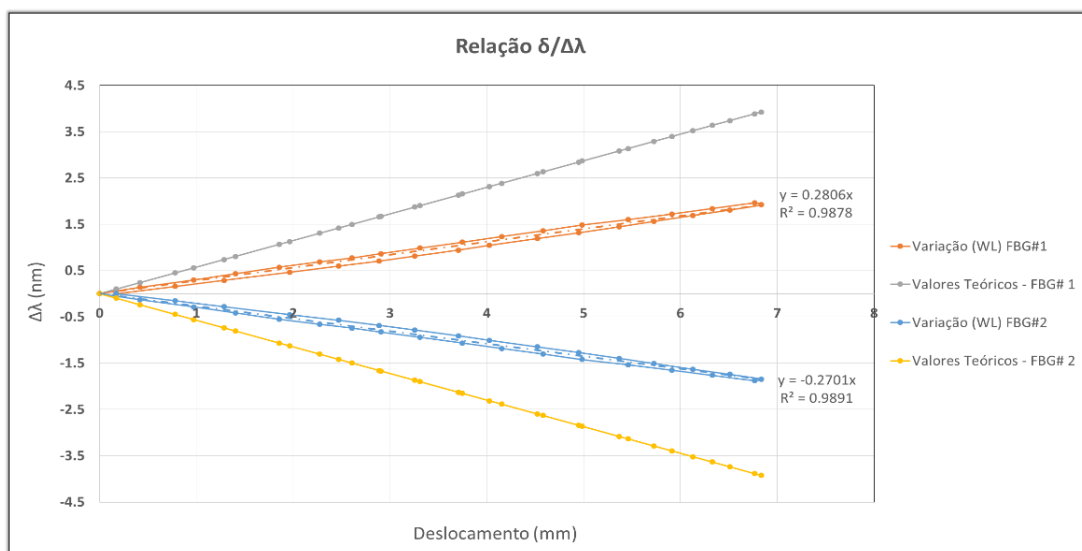


Figura 10 - Relação da variação de comprimento de onda (nm) com os deslocamentos aplicados (mm)

A sensibilidade experimental obtida, patente na Figura anterior, ronda os 0.27 a 0.28 nm/mm. Verifica-se assim que o sensor apresenta uma sensibilidade abaixo dos 50% da esperada pelos valores teóricos. Em termos de comparação era estimado que uma variação de 1nm do comprimento de onda ocorresse no sensor por cerca dos 2 mm de deslocamento, caso que apenas ocorre quando aplicados quase 4 mm.

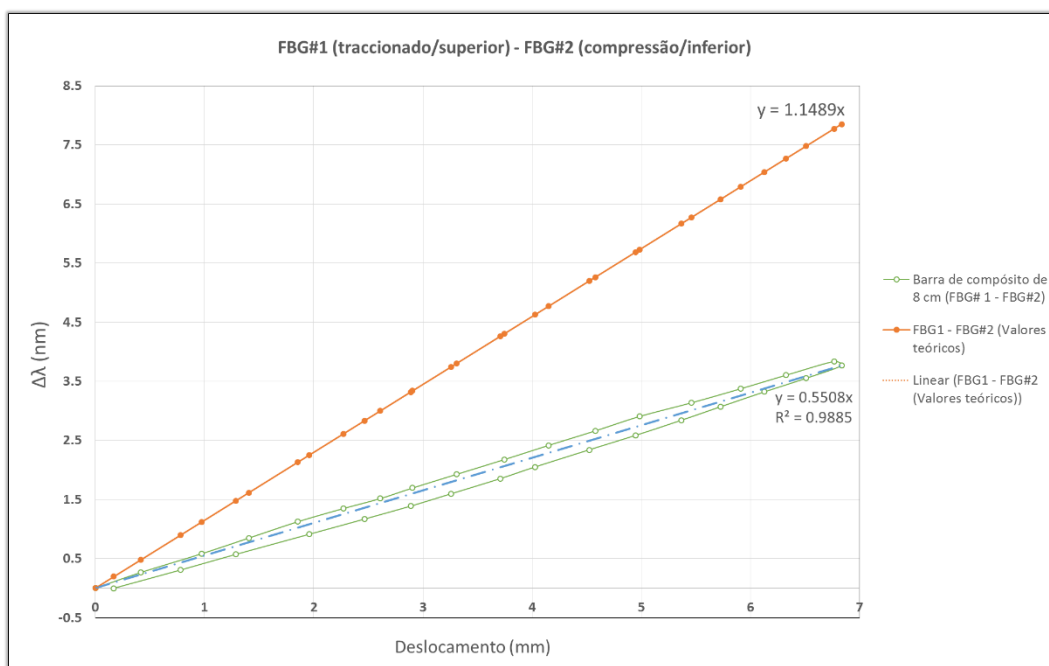


Figura 11 - Diferença dos comprimentos de onda dos FBG (FBG#1-FBG#2) com deslocamentos aplicados (mm)

A figura 11 apresenta o gráfico representativo da diferença da variação dos comprimentos de onda entre os 2 FBG (superior e inferior), dados relevantes para o cálculo do erro apresentado pelo sensor. Comprova-se mais uma vez que a sensibilidade apresentada pelo sensor é cerca de metade da expectável pelos valores teóricos. O valor do erro da histerese apresentada (gráfico 4) é calculado pela divisão, entre a diferença do valor de comprimento de onda respetivo da equação da reta de regressão linear correspondente aos valores experimentais (figura 9) e os valores da variação de comprimento de onda experimentais, com o maior valor da variação de onda atingida durante o teste, ou seja:

$$Erro (\%) = \frac{((calibração * \delta) - \Delta\lambda(medido))}{\Delta\lambda(máximo)} * 100$$

Apresenta-se então de seguida os respetivos erros para cada um dos patamares de deslocamentos efetuados:

Quadro 2 - Erros (%) respetivos de cada patamar de deslocamento

δ(mm)	0.000	0.417	0.973	1.405	1.855	2.272	2.609	2.905	3.308	3.746	4.152	4.579	4.986	5.458	5.912	6.327	6.765	6.834	6.510	6.127	5.727	5.366	4.947	4.523	4.026	3.707	3.257	2.888	2.467	1.961	1.285	0.778	0.170
Erro(%)	0.000	-0.955	-1.211	-1.917	-2.683	-2.499	-2.052	-2.462	-2.691	-2.940	-3.368	-3.629	-4.162	-3.373	-3.079	-3.090	-2.838	-0.030	0.901	1.404	2.195	2.997	3.637	3.916	4.352	4.924	5.137	5.264	4.909	4.344	3.555	3.167	2.471

Admite-se então que o máximo erro encontrado no 1º teste de deslocamento efetuado ao *ShapeSensor* é de 5.264%.

Test Conclusion

Conclusion

Dos resultados apresentados conclui-se que o protótipo possui uma sensibilidade de 0,55 nm/mm quando a estimada correspondia a 1,15 nm/mm, ou seja, a sensibilidade verifica-se menor (cerca de metade) do esperado.

O protótipo apresenta erros devido a histerese com um valor máximo de 5.264%, valor considerado demasiado elevado para o sensor.

O sensor apresenta diversos fatores onde é possível interferir para diminuir a diferença de resultados entre os valores experimentais e os teóricos. São apresentadas hipóteses de possíveis soluções com vista a aumentar a sensibilidade do sensor até valores mais próximos dos teóricos:

- Retirar as folgas existentes entre o silo e a estrutura metálica, e as folgas que possam existir entre as peças metálicas e a barra de compósito (com o objetivo de reduzir o erro da histerese);
- Realizar o teste com um controlo mais rigoroso dos deslocamentos e das respetivas cargas;

Para além disso, poderá ser possível aumentar a sensibilidade do sensor com as seguintes hipóteses:

- Aumentar a altura da barra de compósito (contudo é de referir que o aumento da altura da barra de compósito provoca como consequência um aumento da rigidez do sensor.
- Diminuir o comprimento da barra de compósito (aumento da rigidez);
- Diminuir até o mais próximo possível de zero a distância entre os FBG e o eixo de rotação da barra de compósito (maiores valores de deformação);

Test Sequence Number	
Number	Description
2	Teste de deslocamento – com barra de compósito de 4 cm de comprimento.

De modo a aumentar a sensibilidade do protótipo, foram alteradas duas características em comparação à barra utilizada no 1º teste de deslocamento. O comprimento da barra foi reduzida para metade, ou seja 4 cm, e a distância dos FBG ao eixo de rotação foi igualmente reduzida. Foram também retiradas as folgas existentes no silo, com recurso a um silo de maior diâmetro.

Quadro 3 - Características da barra de compósito utilizada no 2º teste

Caraterísticas da Barra de Compósito	
Altura barra compósito (mm)	4.75
Comprimento barra compósito (cm)	4
Distância aos sensores FBG's (mm)	8

Foi realizado o mesmo procedimento que no primeiro teste, o sensor foi de igual maneira fixado à mesa com a barra metálica suspensa, contendo no seu extremo o comparador digital para a leitura dos deslocamentos.

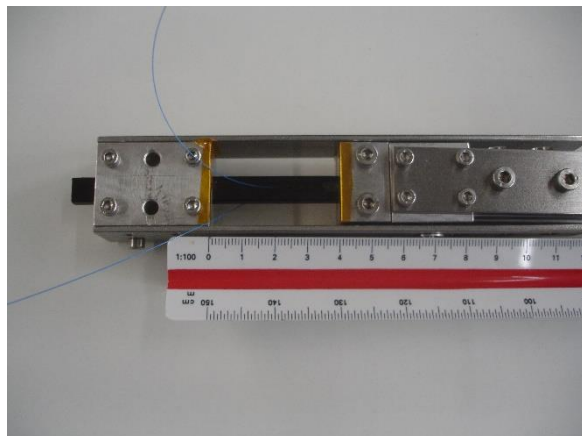


Figura 12 – Sensor Shape com barra de compósito de 4 cm de comprimento

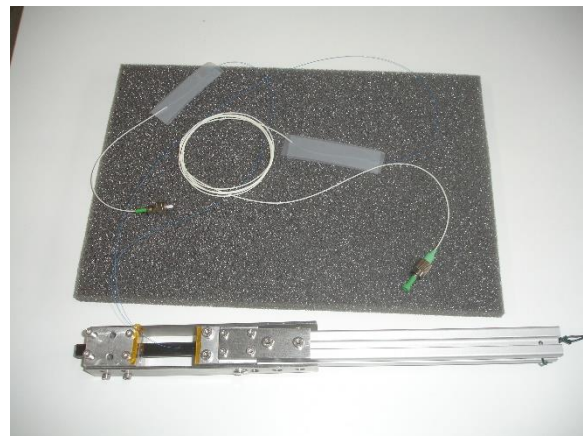


Figura 13 – Vista Superior do sensor Shape com barra de compósito de 4 cm

O teste foi realizado novamente impondo patamares de carga de 0.5 Kg. Foi iniciado sem qualquer carga inicial tendo sido alcançado um valor máximo de carga de 8.0 kg, a qual correspondeu um deslocamento de 3.783 mm. De seguida foi igualmente feita a descarga, com intervalos de igual valor, até à sua carga inicial de valor 0.

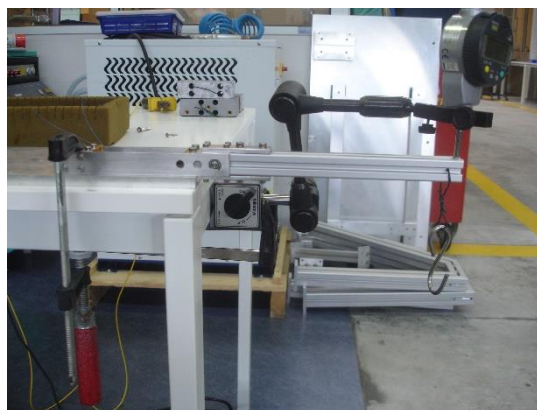


Figura 14 – Teste de deslocamento no sensor shape

Foram realizados novamente 32 patamares de deslocamentos, sendo 16 deles respetivas da carga e os outros 16 da descarga. Apresenta-se em baixo na Figura 15 os patamares efetuados.

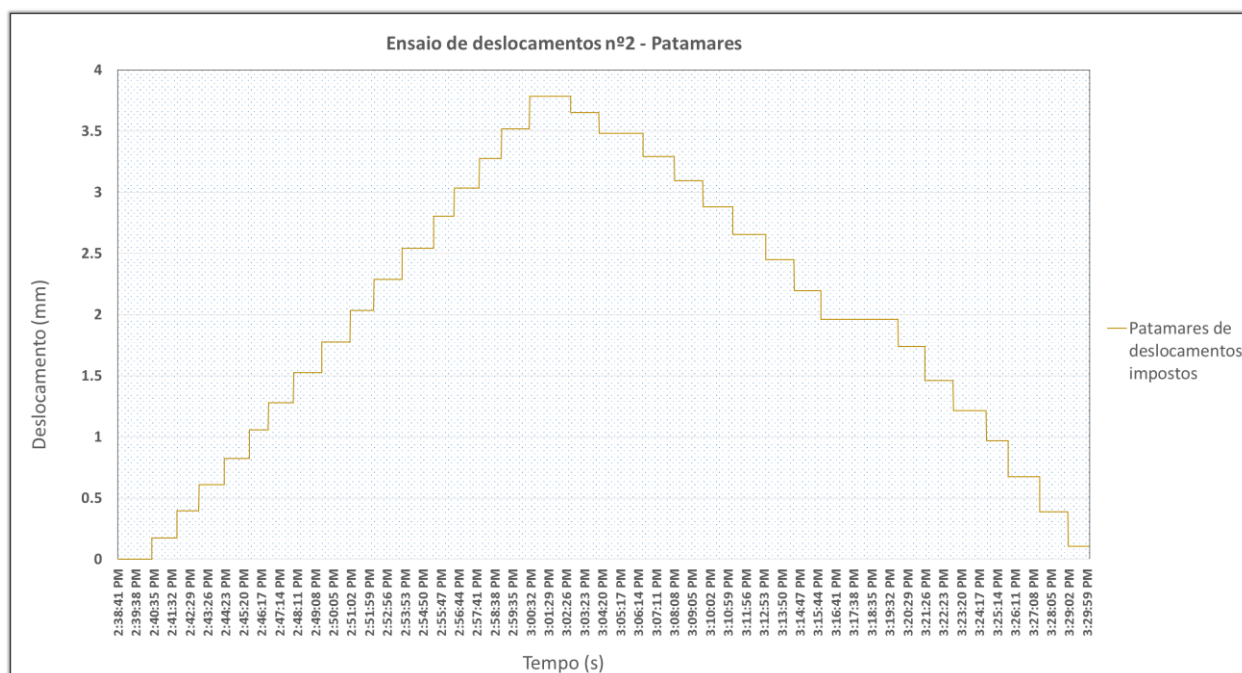


Figura 15- Deslocamentos efetuados e respetivas cargas exercidas do 2º teste de deslocamento

Devido a uma maior rigidez do conjunto sensor comparado com a barra de 8 mm é possível comprovar pela leitura do gráfico em cima apresentado que com a mesma carga exercida em ambos os testes, a barra de 4 cm apresenta deslocamentos inferiores.

Quadro 4 - Relação dos deslocamentos com as respectivas cargas exercidas do 2º teste de deslocamento

Sequência dos patamares de deslocamentos efectuados (mm)	0.000	0.417	0.973	1.405	1.855	2.272	2.609	2.905	3.308	3.746	4.152	4.579	4.986	5.458	5.912	6.327	6.765	6.834	6.510	6.127	5.727	5.366	4.947	4.523	4.026	3.707	3.257	2.888	2.467	1.961	1.285	0.778	0.170
Carga exercida (Kg)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	7.5	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0

Apresentação dos resultados

No Figura abaixo apresentam-se as variações de comprimento de onda de ambos os FBG do sensor durante o ensaio, em função do tempo.

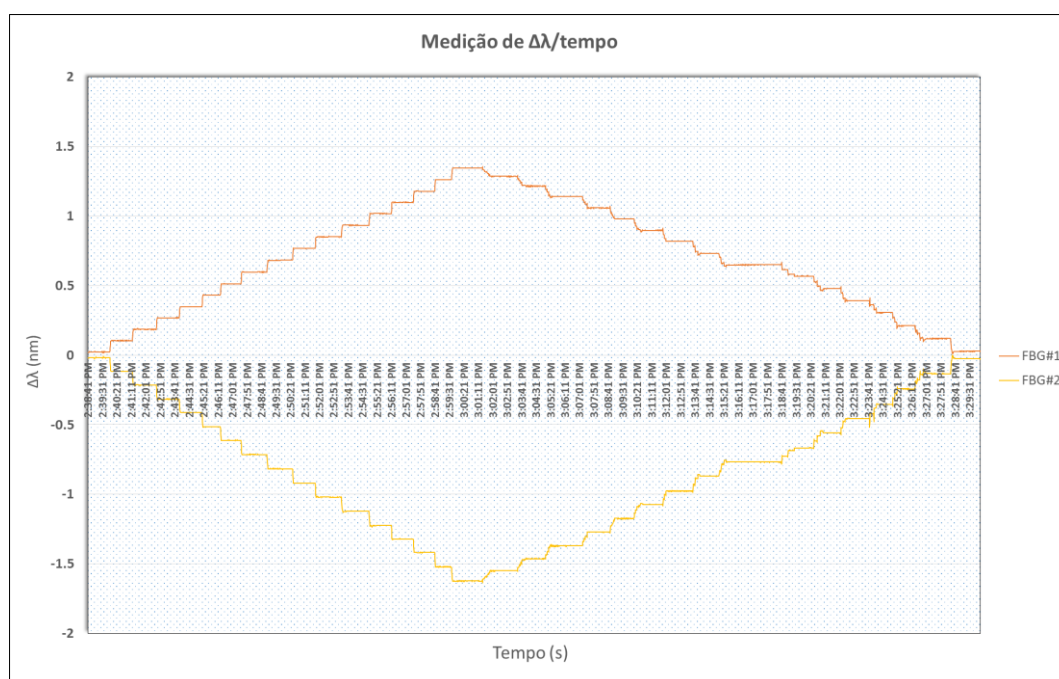


Figura 16 - Variação do comprimento de onda dos FBG em função do tempo (2º teste)

A partir dos valores apresentados na Figura 16 são determinados os valores médios da variação de comprimento de onda respetivos de cada patamar de deslocamento de cada FBG. Para a obtenção da média de cada um dos patamares foram utilizados pontos equivalentes a 30 segundos de ensaio, ou seja, foram utilizados 30 pontos. No gráfico 3, em baixo, são apresentados as variações de comprimento de onda médias para cada patamar de deslocamento aplicado.

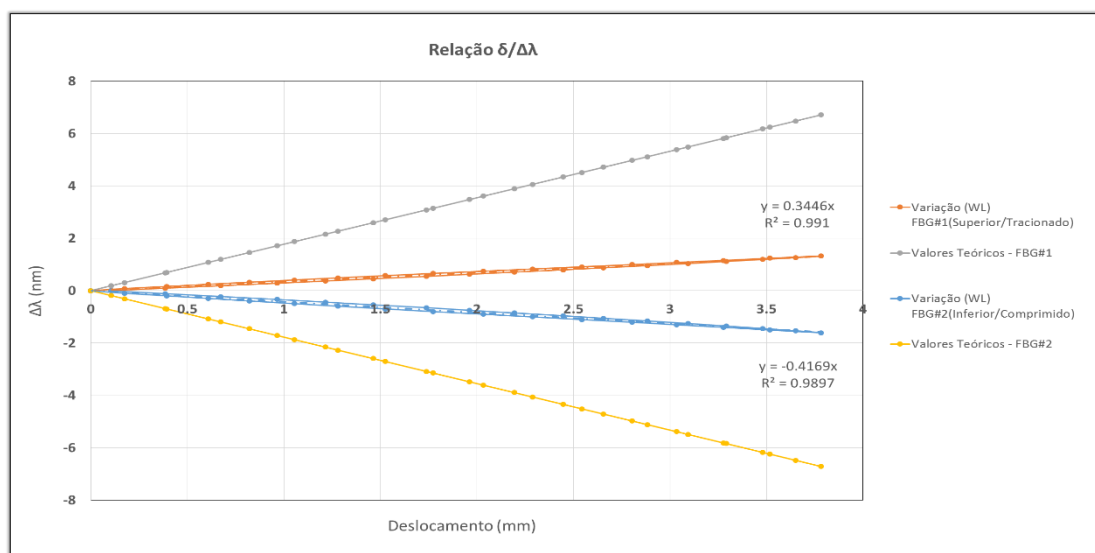


Figura 17- Relação da variação de comprimento de onda (nm) com os deslocamentos (mm)

Pela leitura do gráfico acima apresentado nota-se que o sensor apresenta uma sensibilidade inferior à esperada (valores teóricos) em mais de 50%. Em termos de comparação era estimado que uma variação de 2nm do comprimento de onda ocorresse no sensor por cerca dos 1,1 mm de deslocamento, valor que não chega a ser atingido. Durante este teste não foi possível alcançar os 2nm de variação de comprimento de onda devido à limitação de carga do setup durante o ensaio. Da mesma forma que no 1º teste, em ambos os FBG (superior e inferior), nota-se que o traçado da variação de comprimento de onda não é igual aquando da carga e descarga.

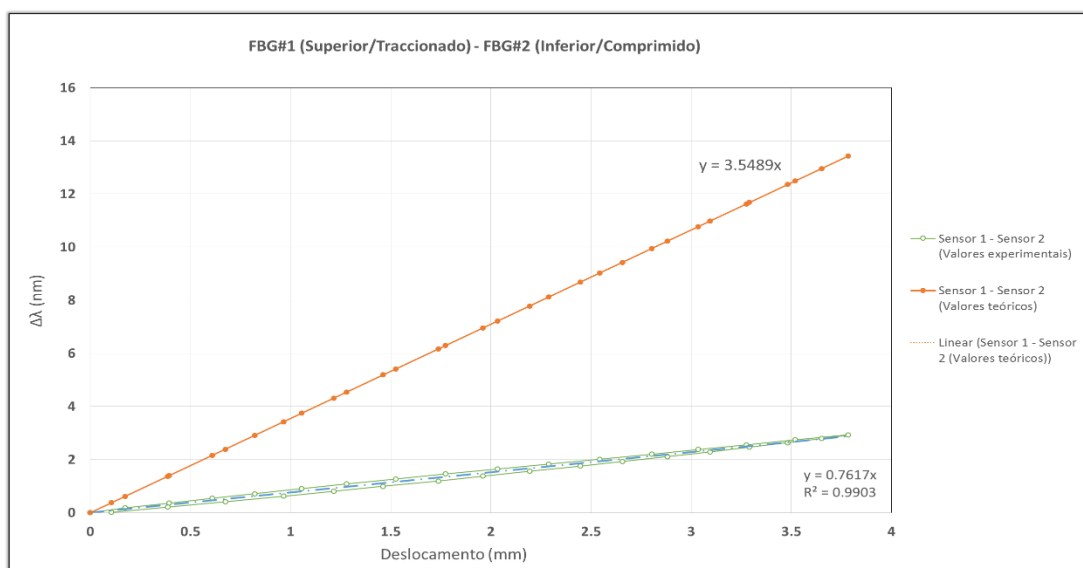


Figura 18 - Diferença dos comprimentos de onda dos sensores (Sensor 1 - Sensor 2) com os deslocamentos aplicados (mm) referentes ao 2º teste

A figura 18 apresenta a diferença dos comprimentos de onda entre os 2 FBG (superior e inferior), dados relevantes para o cálculo do erro apresentado pelo sensor. Comprova-então que a sensibilidade apresentada pelo sensor é inferior a metade do expectável pelos valores teóricos. O valor do erro é calculado novamente pela divisão, entre a diferença do valor entre a equação da reta de regressão linear correspondente aos valores experimentais e os valores da variação de comprimento de onda reais, com o maior valor a variação de comprimento de onda atingida durante o teste, ou seja:

$$Erro (\%) = \frac{((Calibração * \delta) - \Delta\lambda(medido))}{\Delta\lambda(maior)} * 100$$

Apresenta-se então de seguida os respetivos erros para cada um dos deslocamentos efetuados:

Quadro 5 - Erros (%) respetivos de cada patamar de deslocamento referentes ao 2º teste de deslocamento

δ(mm)	0.000	0.174	0.394	0.609	0.821	1.055	1.280	1.526	1.773	2.034	2.288	2.543	2.804	3.034	3.276	3.518	3.783	3.651	3.481	3.291	3.093	2.882	2.656	2.447	2.193	1.960	1.737	1.462	1.215	0.966	0.674	0.386	0.106
Erro(%)	0.000	1.602	2.011	2.669	3.137	3.482	3.684	3.664	3.723	3.267	2.975	2.633	2.226	2.296	2.018	2.113	1.578	0.407	0.461	1.296	2.327	2.827	3.200	3.739	3.742	4.023	4.432	3.994	4.067	3.979	3.441	2.835	2.370

Afirma-se então que o máximo erro encontrado no 2º teste de deslocamento efetuado ao sensor é de 4.432%.

Test Conclusion

Conclusion

O sensor apresenta uma sensibilidade muito inferior ao expectável. Teoricamente o sensor deveria atingir os 2 nm de variação de comprimento de onda quando exercidos 1,1 mm de deslocamento, quando para este deslocamento apenas ocorre uma variação de 0.5 nm.

Contudo o sensor com a barra de compósito de 4 cm em comparação à do 1º teste de 8 cm de comprimento, apresenta duas melhorias:

- 1) Maior sensibilidade
- 2) Menor erro (%) de histerese

O sensor apresenta ainda alguns fatores onde é possível interferir para diminuir a ainda existente diferença de resultados entre os valores experimentais e teóricos. São apresentadas uma série de soluções com vista a aumentar a sensibilidade do sensor até valores mais próximos do objetivo.

- Colocar os FBG do sensor em cima do eixo de rotação;
- Realizar o teste com um controlo mais rigoroso dos deslocamentos e das respetivas cargas;
- Aumentar a altura da barra de compósito (contudo é de sinalizar que o aumento da altura da barra de compósito provoca como consequência um aumento de rigidez do sensor).

Test Sequence Number	
Number	Description
3	Teste de deslocamento – com barra de compósito de secção oca quadrada (8*8 mm ²)

No terceiro teste de deslocamento procurou-se obter melhores resultados de sensibilidade com recurso a uma barra de compósito de maior altura (8 mm). Para tal foi utilizada uma barra de compósito da *Easy Composites* de secção quadrada com um comprimento de 4 cm.



Figura 19 - "Carbon Fibre Box Section" – Secção de 8 mm com 0.5 mm de espessura

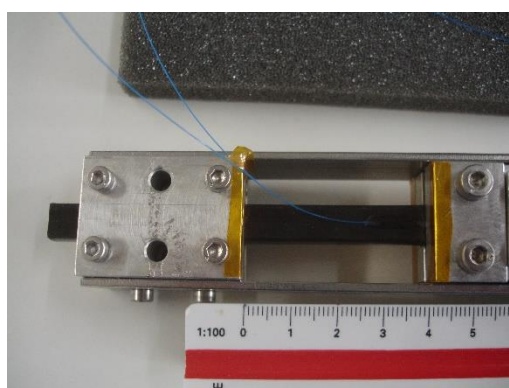


Figura 20 - Barra de compósito de secção oca com 4 cm de comprimento

A colagem dos FBG foi realizada colocando-os a uma distância do eixo de rotação igual à da barra do teste nº2.

Quadro 6 - Caraterísticas da barra de compósito oca

Caraterísticas da Barra de Compósito	
Altura barra compósito (mm)	8
Comprimento barra compósito (cm)	4
Distância aos sensores FBG's (mm)	8
Espessura das paredes da barra oca de compósito (mm)	0.5

Test

Test

O teste não foi possível de concluir visto a barra oca apresentar uma série de fragilidades que comprometem a sua utilização para este sensor. Apesar de a barra apresentar, quando comparada as barras de secção cheia, uma menor rigidez e uma maior altura o que lhe permitiria dar uma maior sensibilidade ao conjunto sensor, tal não acontece, pois quando submetida ao teste de deslocamento, ou seja quando sujeita à rotação originada pelos deslocamentos impostos na barra metálica a barra de compósito parte e começa a fraturar nos cantos das secções extremas (Figura 14). Outra das razões para o insucesso do teste passou pelo facto das peças metálicas não estarem preparadas para envolver uma barra com 8 mm de altura o que originou algumas folgas como se pode comprovar pelas figuras em baixo apresentadas.

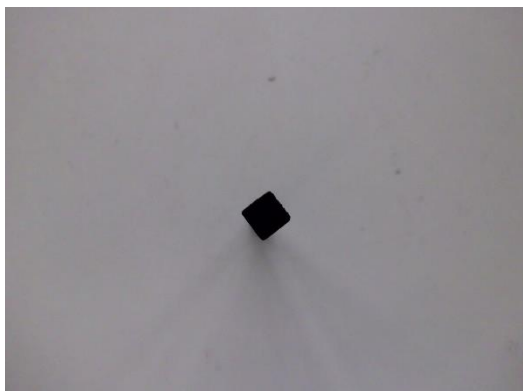


Figura 22 - Barra de compósito antes do teste

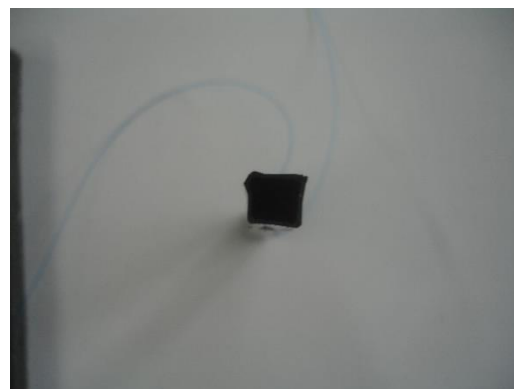


Figura 21 - Barra de compósito oca, danificada depois do teste de deslocamentos

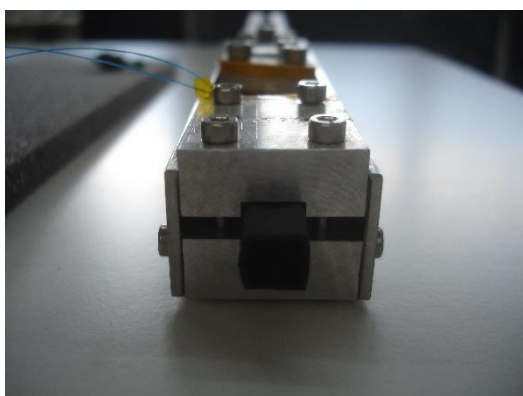


Figura 23 - Conjunto sensor, com barra de compósito oca antes do teste



Figura 24 - Conjunto sensor, com barra de compósito oca danificada depois do teste de deslocamentos

QMS Document Name	Internal Development Test Report	Doc Ref: itestr/o.1/xx
QMS Document Description FiberSensing Internal Development Test Report		
Date	File Name	Pages
26 October 2014	Relatório de Testes ShapeSensor	32
Tip: to ensure correct File name right click and select Update Field		

Test Conclusion

Conclusion

As barras de compósito de secção oca não são indicadas de serem utilizadas para o Shape sensor. As fibras de carbono da barra de compósito quando sujeito aos deslocamentos realizados no sensor descolam-se e separam-se umas das outras não permitindo a reposição da barra à sua forma original.

Test Sequence Number	
Number	Description
4	Ciclos de Temperatura – no sensor com barra de 8 cm de comprimento

Test Diagram

Diagram

Para avaliação do comportamento térmico do sensor este foi testado sobre condições de mudança de temperatura. Neste primeiro teste de temperatura foi utilizada a barra de compósito de secção 8.26*4.75 mm² (barra correspondente ao teste nº1 de deslocamentos) com 8 cm de comprimento.

O sensor foi inserido no interior da câmara térmica, sendo de seguida sujeito às temperaturas extremas entre os -25°C e aos 75°C. O teste teve uma duração total de 27 horas e os patamares de temperatura encontram-se representados na Figura 27. O perfil de temperatura utilizado neste teste foi definido por um outro ensaio paralelo tendo sido aproveitado apenas para uma primeira avaliação do comportamento deste protótipo.



Figura 25 – Câmara Térmica



Figura 26 – ShapeSensor (barra de compósito de 8cm) no interior da câmara térmica

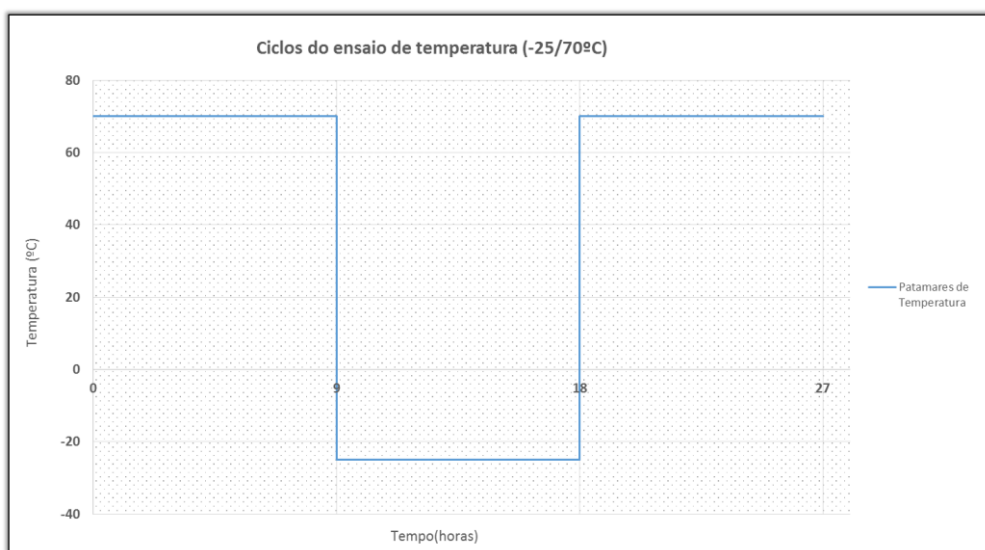


Figura 27 – Ciclo de temperatura (1º teste de temperatura)

Ambos os FBG foram ligados à unidade de medição.

A informação foi recolhida em comprimento de onda (nm) para os dois FBG do sensor. Apresentam-se de seguidas as variações de comprimento de onda referentes aos dois FBG do sensor (Figura 28 e Figura 29).

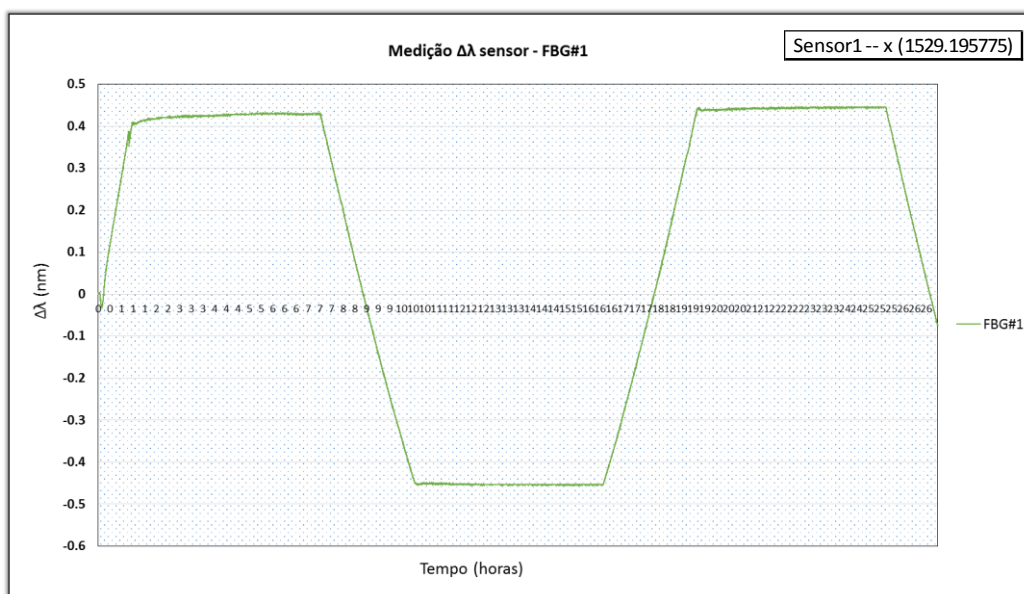


Figura 28 - Medição da variação do comprimento de onda do FBG#1

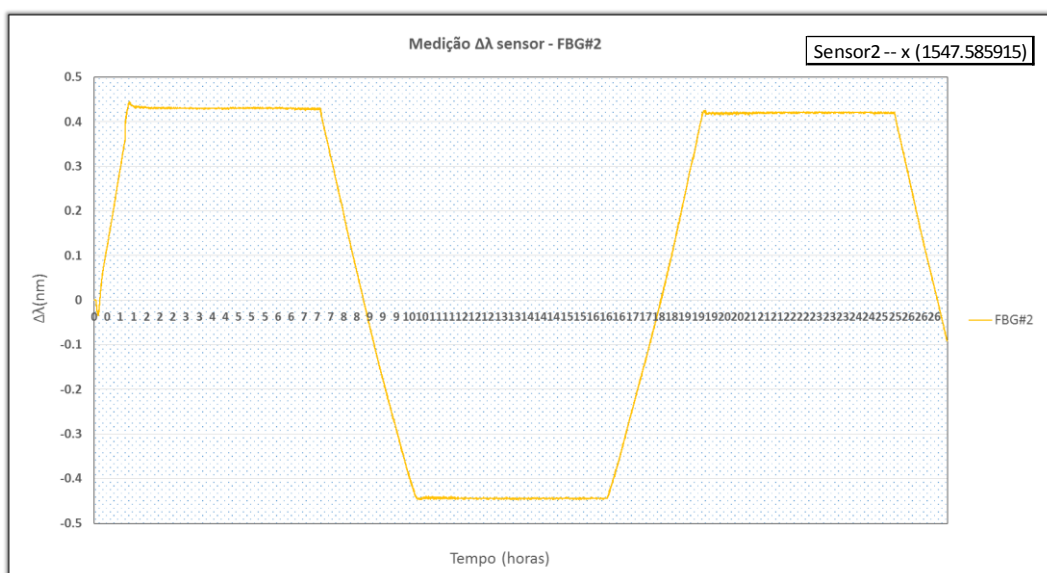


Figura 29 - Medição da variação do comprimento de onda do FBG#2

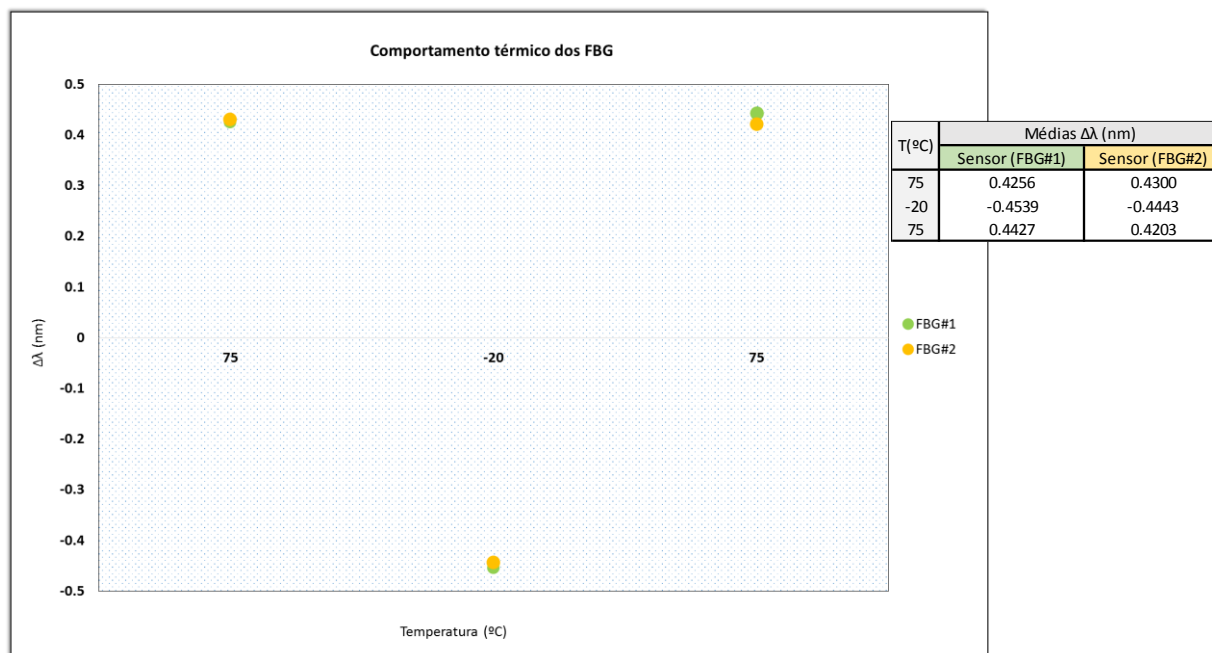


Figura 30 – Valor médio de $\Delta\lambda$ de cada FBG

Note-se que os valores da variação de comprimento de onda de ambos os FBG se encontram relativamente aproximados (Figura 30) esperando-se que o erro originado por efeitos de variação de temperatura seja de valor reduzido.

Estimativa do erro de medição associado à variação térmica

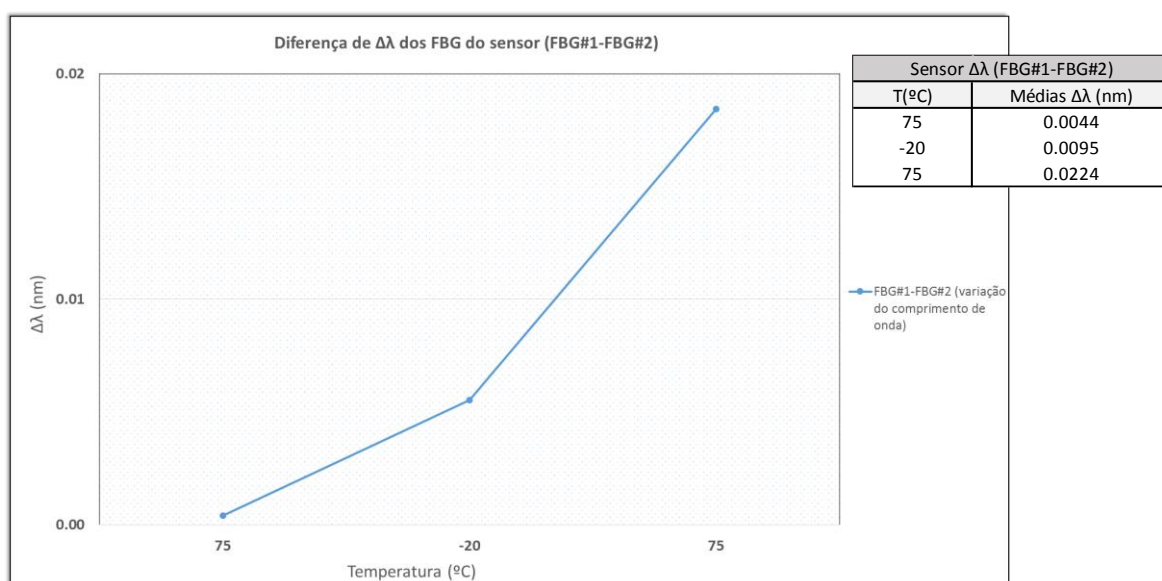


Figura 31 – Diferencial dos dois FBG (FBG#1-FBG#2)

Para que o sensor apresentasse um erro de valor nulo, ou seja, que fosse perfeitamente auto compensado quando colocado sobre efeitos de variação de temperatura os FBG do sensor teriam que apresentar uma diferença de valores de $\Delta\lambda$ entre eles de 0 nm.

De modo a obter-se os valores do erro, fez-se associar as variações de comprimento de onda respectivos da figura 32 a deslocamentos com recurso aos valores teóricos do sensor.

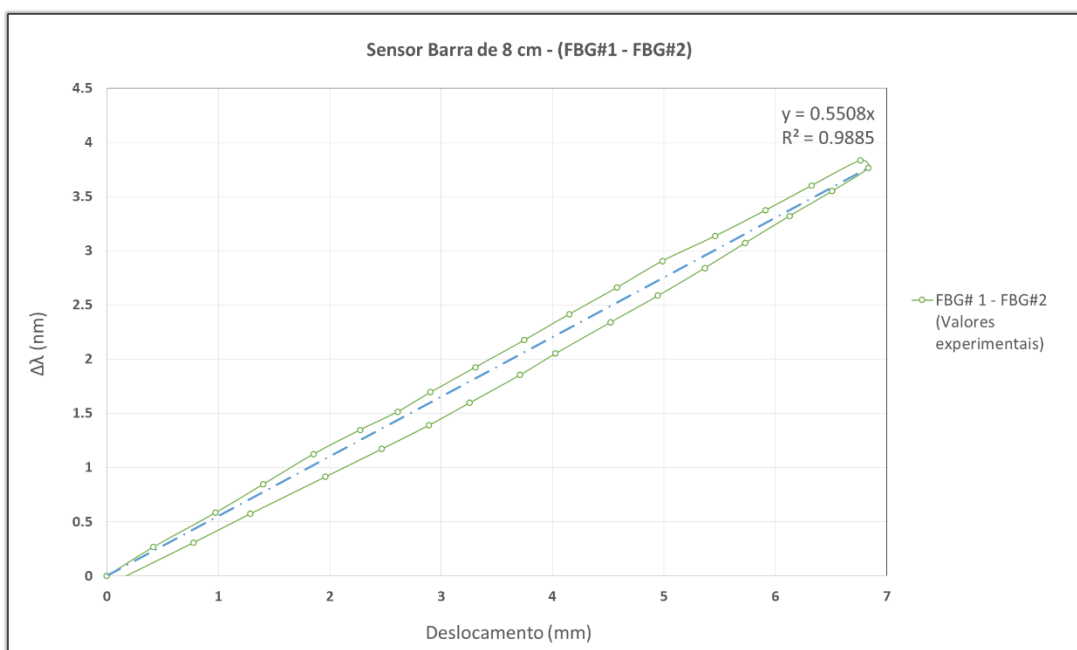


Figura 32 - Relação da variação de comprimento de onda (nm) com deslocamentos (mm) – Valores experimentais

Quadro 7- Deslocamentos associados à diferença dos comprimentos de onda entre os FBG

Sensor - barra 8 cm (FBG#1-FBG#2)		
T(°C)	Médias ($\Delta\lambda$)	δ (mm)
75	0.004	0.008
-20	0.010	0.017
75	0.022	0.041

Obtidos já os deslocamentos associados à diferença de $\Delta\lambda$ entre os FBG, valores apresentados no Quadro 7, é possível calcular o erro proveniente da alteração de temperatura associados ao sensor. O cálculo do erro é feito de igual forma ao calculado para os testes de deslocamento.

Quadro 8 - Erros provenientes de variações de temperatura

Teste de Temperatura - Barra 8 cm	
T(°C)	ERRO (%)
75	0.68
-20	0.71
75	0.79

Para este teste sensor apresenta um erro máximo de 0.79%.

Test Conclusion

Conclusion

Numa 1ª avaliação de comportamento térmico do protótipo conclui-se que este apresenta um comportamento aceitável quando sujeito a alterações de temperaturas.

- O sensor apresenta um valor de erro de 0.79%, valor considerado satisfatório para um sensor de auto compensação de temperatura;
- Em termos de erros associados à variação de temperatura o sensor apresenta um erro sobre a obtenção de deslocamentos de 0.041 mm.

Considerações

- É necessário realizar um teste de temperatura mais completo, com um maior número de patamares de temperatura.

Test Sequence Number	
Number	Description
5	Ciclos de Temperatura (3h por patamar) – no sensor com barra de compósito de 4 cm de comprimento e na barra de compósito com 8 cm de comprimento sem assemblagem metálica.

Test Diagram

Diagram

Neste quinto teste foram inseridos no interior da câmara de teste cinco diferentes FBG, dois correspondentes ao sensor com uma barra de compósito de 4 cm, dois da barra de compósito livre com 8 cm de comprimento e um sensor de temperatura.



Figura 33 – Sensor Shape com barra de 4 cm, barra de compósito livre e sensor de temperatura no interior da câmara térmica



Figura 34 – Câmara de ciclos térmicos

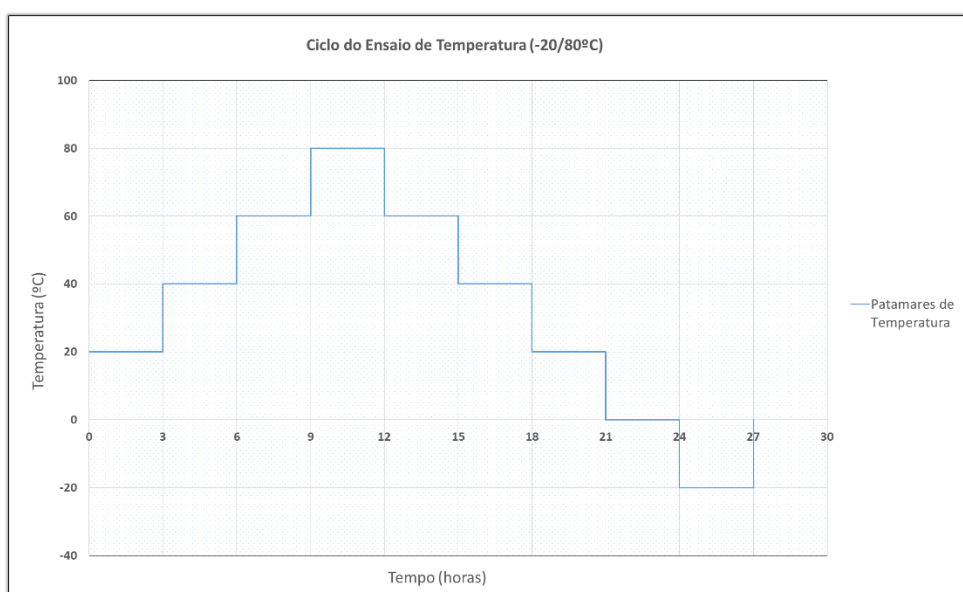


Figura 35 – Câmara de ciclos térmicos do 2º ensaio de temperatura

Todos os FBG foram ligados à unidade de medição.

A informação foi recolhida em variação de comprimento de onda (nm) para os cinco FBG.

É apresentado de seguida nas Figuras em baixo apresentadas os valores das variações de comprimento de onda dos FBG submetidos ao ciclo de temperatura.

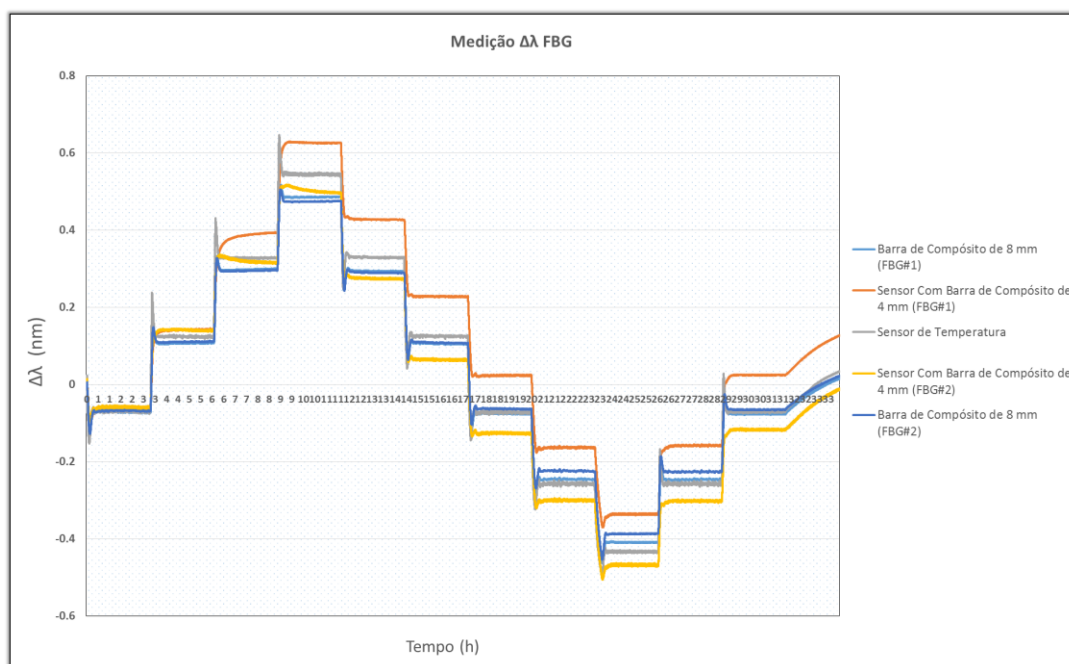


Figura 36 - Medição da variação do comprimento de onda dos FBG

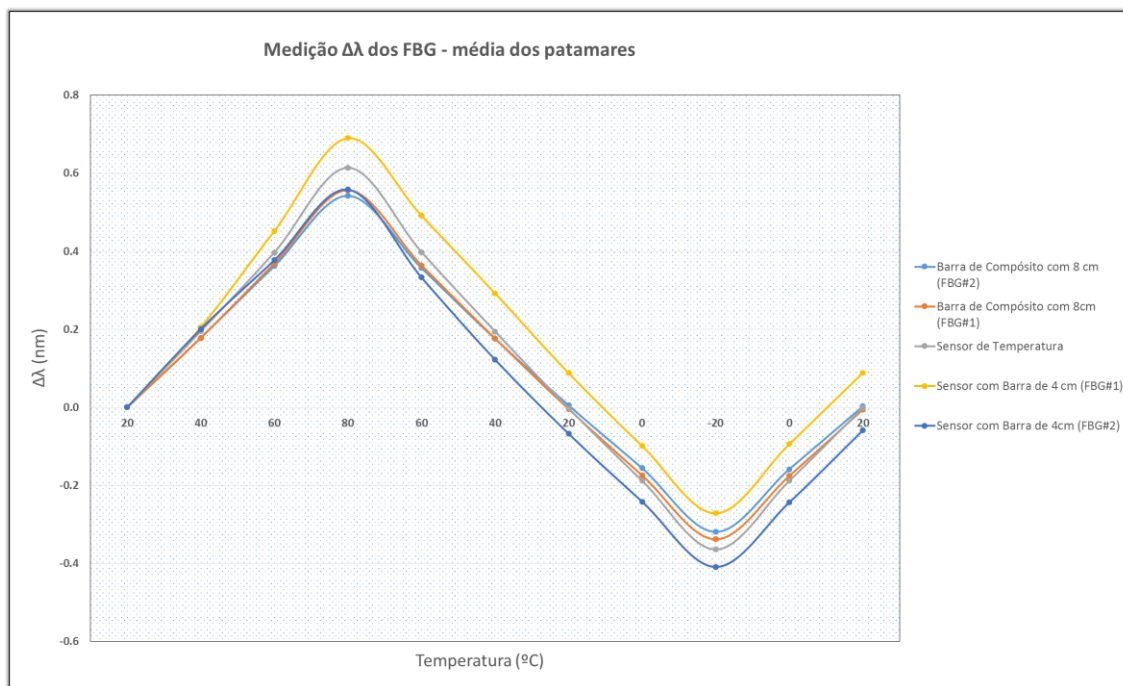


Figura 37 - Média das medições nos comprimentos de onda dos FBG

Estimativa do Erro associado

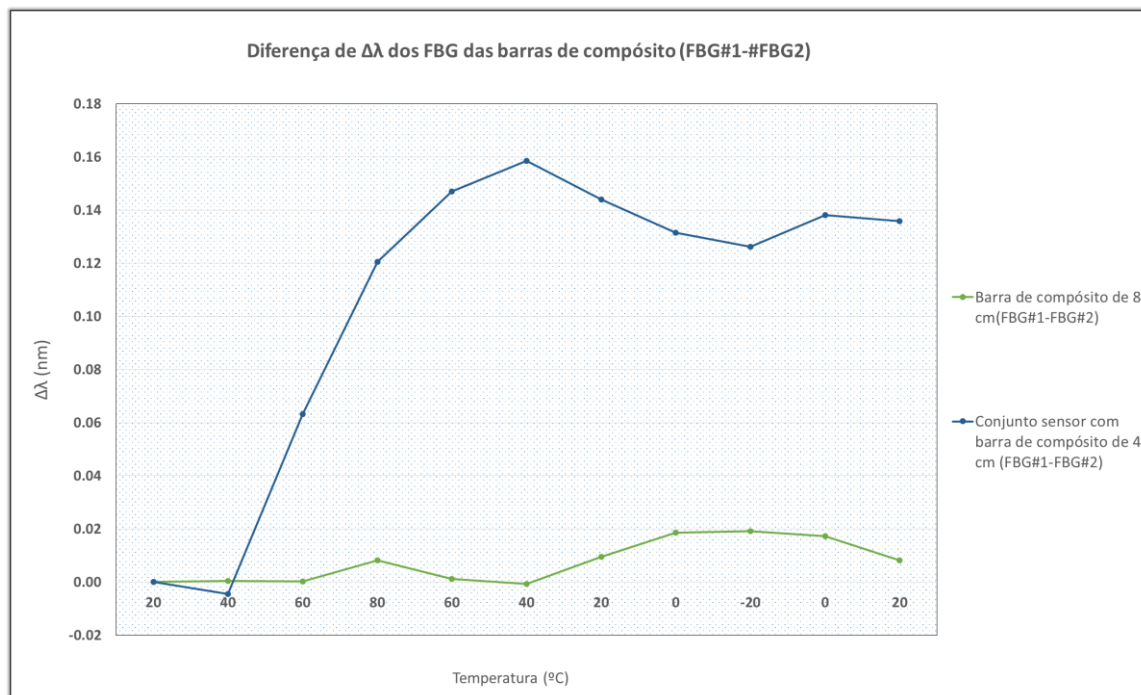


Figura 38 - Valores médios da diferença da $\Delta\lambda$ dos sensores em cada patamar de temperatura

Quadro 9 - Valores médios da diferença da $\Delta\lambda$ dos sensores em cada patamar de temperatura

T (°C)	$\Delta\lambda$ média FBG#1-FBG#2 (nm)	
	Barra 8 cm	Conjunto sensor - Barra 4 cm
20	0.0000	0.0000
40	0.0005	-0.0044
60	0.0003	0.0632
80	0.0083	0.1205
60	0.0012	0.1471
40	-0.0007	0.1585
20	0.0096	0.1441
0	0.0186	0.1314
-20	0.0191	0.1262
0	0.0172	0.1381
20	0.0082	0.1358

De maneira a avaliar o comportamento do sensor e necessário calcular o erro encontrado na sua calibração, erro este que representa os valores de deslocamentos que se mediria se o sensor estivesse instalado e tivesse sujeito a uma variação de temperatura ambiente. Faz-se então associar as variações de comprimento de onda respetivos da Quadro 9 a deslocamentos associados com recurso aos valores experimentais do sensor retirados dos ensaios a deslocamentos. Refere-se o facto de que os valores experimentais utilizados para o cálculo do erro da barra de 8 cm, foram obtidos pelo ensaio de deslocamentos sobre o conjunto, barra e peças metálicas (conjunto sensor), enquanto que neste ensaio de temperatura a barra foi testada não estando envolvida pelas peças metálicas.

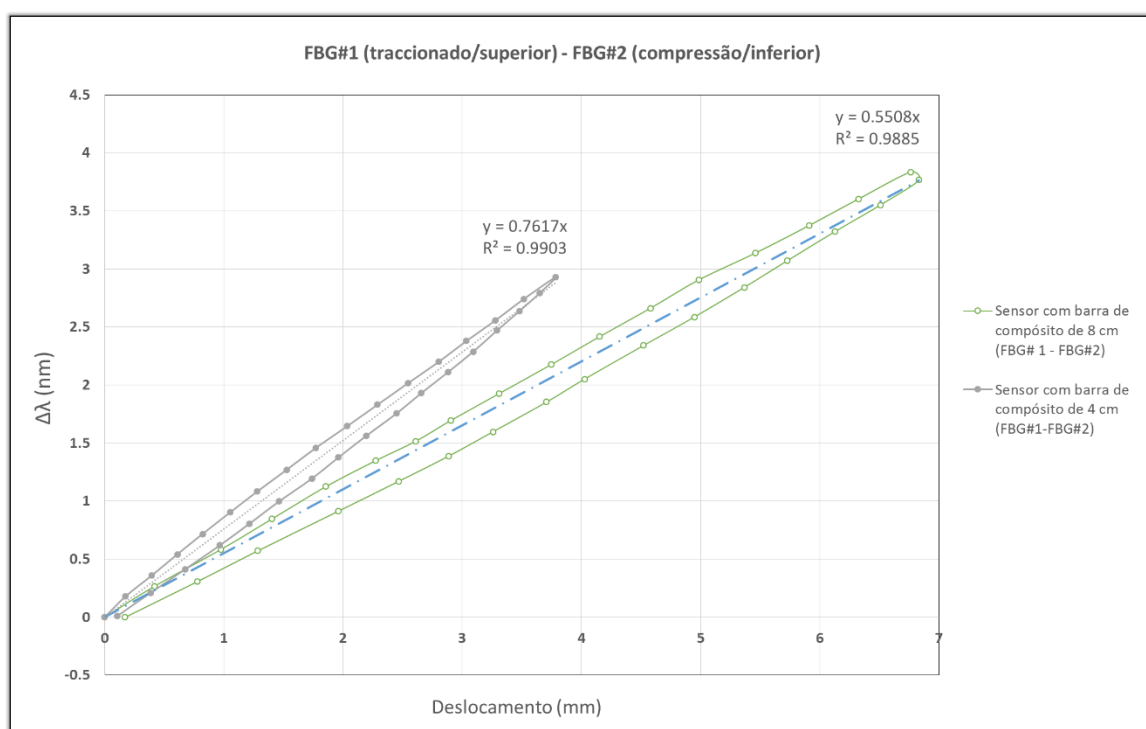


Figura 39 - Relação da variação de comprimento de onda (nm) com deslocamentos (mm) – Valores experimentais

Quadro 10- Deslocamentos associados à diferença dos comprimentos de onda entre os FBG

T (°C)	δ (mm)	
	Barra 8 cm	Sensor com barra de 4 cm
20	0.0000	0.0000
40	0.0009	-0.0058
60	0.0006	0.0829
80	0.0150	0.1582
60	0.0022	0.1931
40	-0.0013	0.2081
20	0.0174	0.1892
0	0.0338	0.1725
-20	0.0347	0.1656
0	0.0313	0.1813
20	0.0149	0.1783

Obtidos já os deslocamentos associados à diferença de $\Delta\lambda$ entre os FBG é possível calcular o erro proveniente da alteração de temperatura associados ao sensor. O cálculo do erro é feito de igual forma ao calculado para os testes de deslocamento.

Quadro 11 – Erros provenientes de variações de temperatura para ambas as barras

T (°C)	ERRO (%)	
	Barra 8 cm	Conjunto sensor - Barra 4 cm
20	0.67	0.70
40	0.67	0.66
60	0.67	1.22
80	0.72	1.62
60	0.68	1.79
40	0.66	1.86
20	0.73	1.77
0	0.78	1.69
-20	0.79	1.66
0	0.78	1.74
20	0.72	1.72

O erro máximo registado é de 1.86% para o conjunto sensor (barra de 4 cm) e de 0.79% para a barra livre de 8 cm.

QMS Document Name	Internal Development Test Report	Doc Ref: itestr/o.1/xx
QMS Document Description	FiberSensing Internal Development Test Report	
Date	File Name	Pages
26 October 2014	Relatório de Testes ShapeSensor	32
Tip: to ensure correct File name right click and select Update Field		

Test Conclusion

Conclusion

O *ShapeSensor* apresenta um comportamento irregular quando sujeito a alterações de temperatura:

- O sensor apresenta um valor de erro de 1.68% com uma barra de 4 cm e 0.79% para uma de 8 cm livre, o que significa que as peças metálicas do sensor influenciam de forma negativa a auto compensação da temperatura do sensor. O valor de 1.68% de erro significa numericamente que a variação de temperatura pode influenciar o cálculo final de deslocamento em 0.21 milímetros.
- Os valores de variação de comprimento de onda dos FBG do sensor com barra de compósito de 4cm apresentam valores muito distintos, o FBG#1 apresenta as médias mais elevadas dos patamares de temperatura enquanto que no FBG#2 verificam-se os menores valores.

Considerações:

- Repetir o teste com um igual ciclo de temperatura, mas realizando um ciclo inicial fazendo passar a câmara pelas temperaturas extremas (positiva e negativa) com o objetivo das peças metálicas perderem as tensões residuais acumuladas

Test Sequence Number	
Number	Description
6	Ciclos de Temperatura (1.5h cada patamar) – no sensor com barra de 4 cm de comprimento e na barra de compósito com 8 cm de comprimento.

Neste sexto foram inseridos no interior da câmara de teste os cinco diferentes FBG. Dois correspondentes ao sensor com uma barra de compósito de 4 cm, dois correspondentes à barra de compósito livre com 8 cm de comprimento e um FBG como sensor de temperatura. Ao contrário do teste nº5 neste teste foi reduzido para metade a duração em cada patamar de temperatura, 1.5 h respetivamente em cada um dos patamares de temperatura (-20°C aos 80°C), visto ser tempo suficiente para haver uma estagnação na $\Delta\lambda$ dos FBG em cada patamar.



Figura 40 – Sensores inseridos na Câmara Térmica antes do início do teste

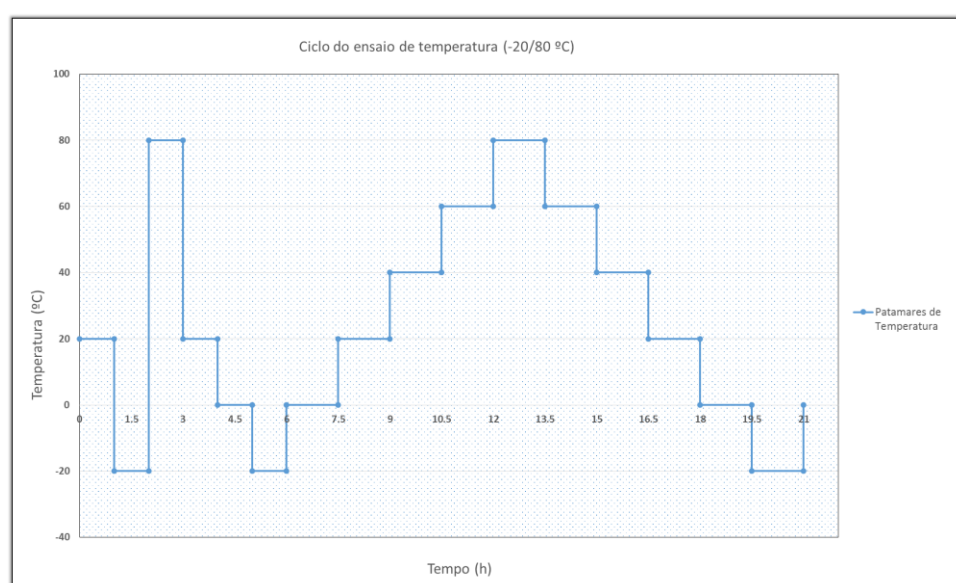


Figura 41 – Ciclo de Temperatura do 6º teste

Todos os FBG foram ligados à unidade de medição.
A informação foi recolhida em variação de comprimento de onda (nm) para os cinco FBG.

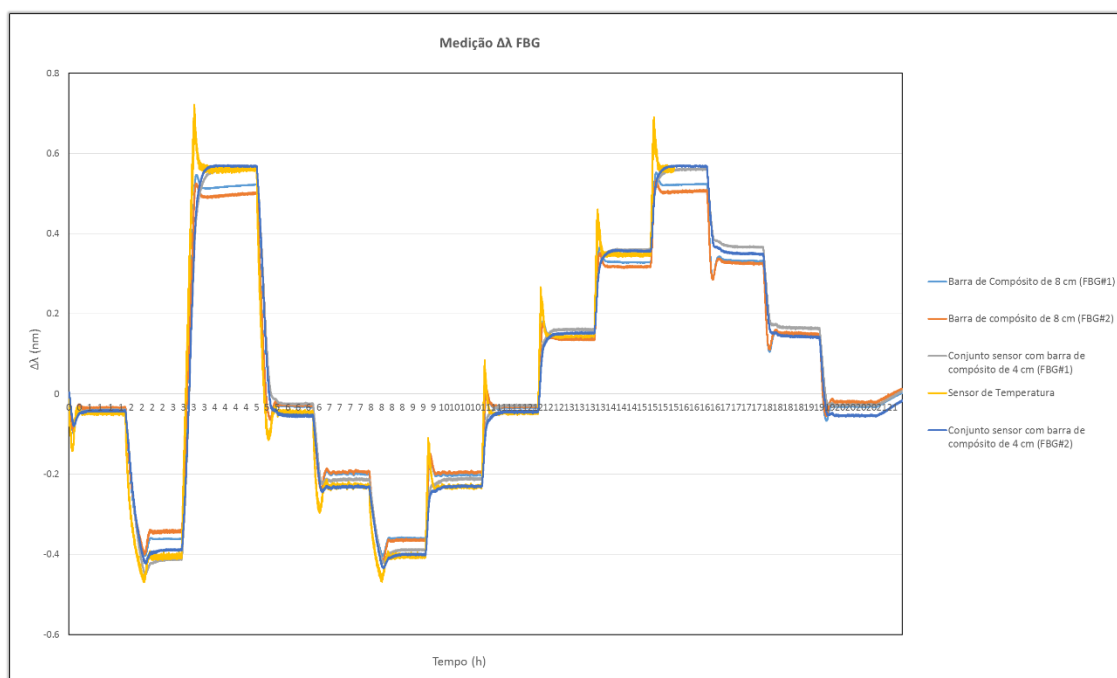


Figura 42 - Medição da variação de comprimento de onda de todos os FBG

As variações dos comprimentos de ondas dos FBG foram zerados no 1º patamar de temperatura, visto quando inseridos no interior da câmara estavam à temperatura ambiente e como fazia com que no 1º patamar já tinham variações.

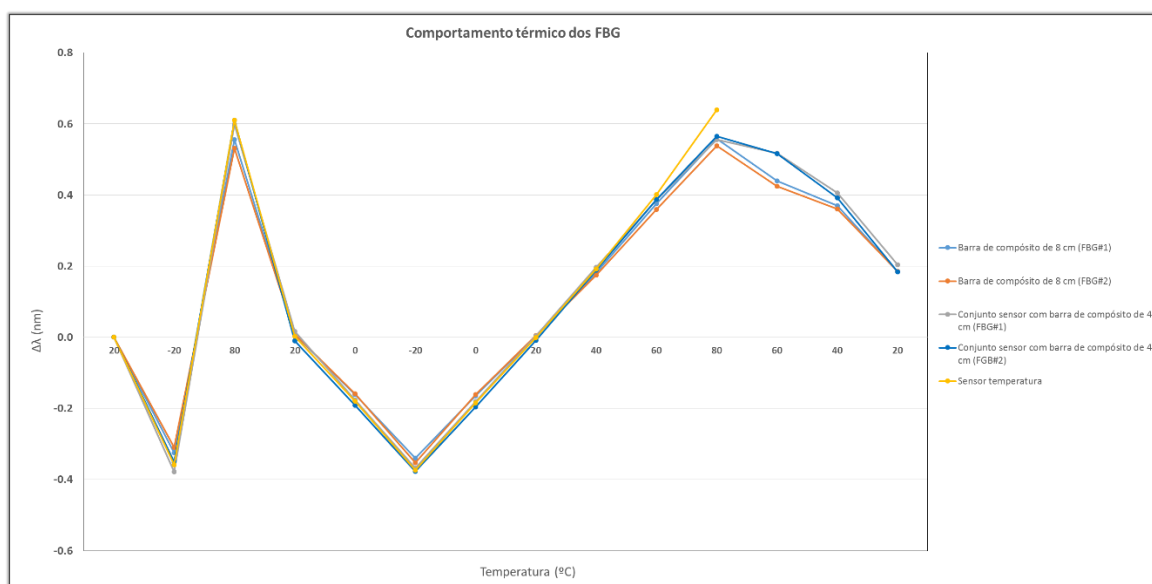


Figura 43 - Média das medições nos comprimentos de onda dos FBG

Note-se que a informação referente ao sensor de temperatura foi perdida quando a câmara atingiu perto do final nos 80 °C. Facto que se explica pelo facto de o sensor de temperatura ter partido quando atingiu pela última vez a temperatura de 80°C.

Estimativa do Erro associado a cada uma das barras

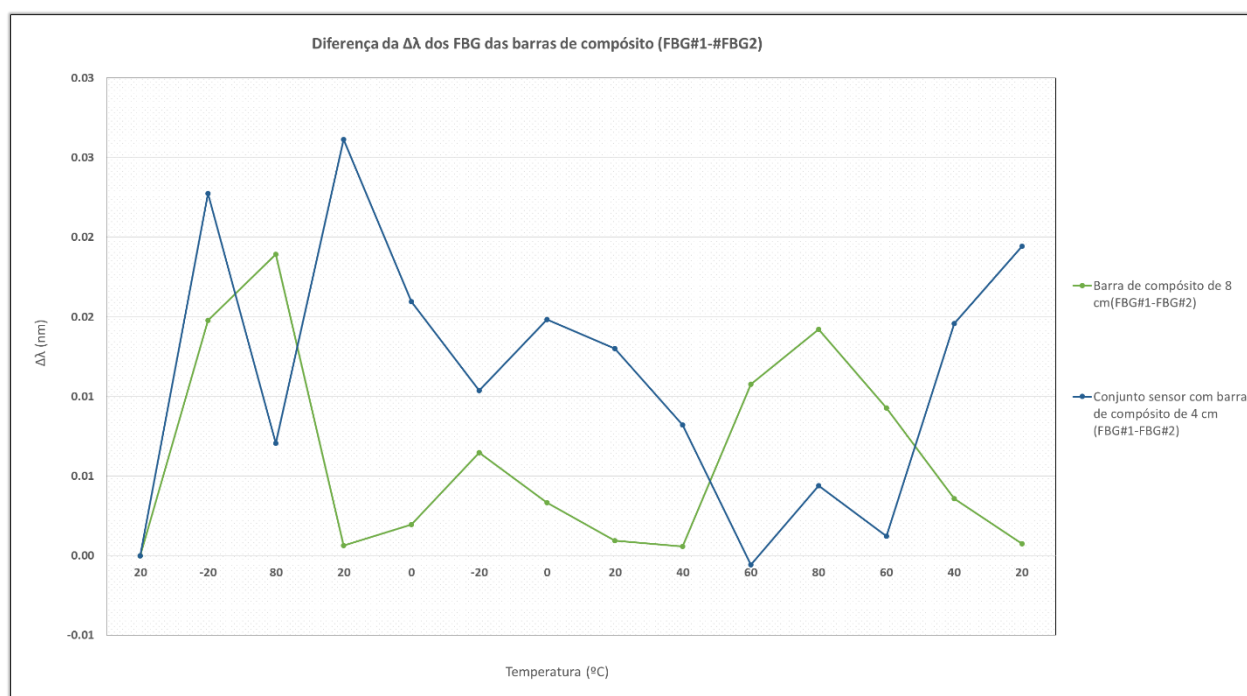


Figura 44 – Diferencial de ambas as barras de compósito testadas

Quadro 12- Diferencial de comprimento de onda dos dois FBG de cada uma das barras testadas

T (°C)	Δλ (nm)	
	Barra 8 cm	Conjunto sensor - Barra 4 cm
20	0.0000	0.0000
-20	0.0148	0.0227
80	0.0189	0.0071
20	0.0006	0.0261
0	0.0020	0.0160
-20	0.0065	0.0104
0	0.0033	0.0148
20	0.0009	0.0130
40	0.0006	0.0082
60	0.0108	-0.0006
80	0.0142	0.0044
60	0.0093	0.0012
40	0.0036	0.0146
20	0.0007	0.0194

O erro determina-se associando-se um deslocamento a cada valor de variação de comprimento de onda através das expressões apresentadas na figura 45, obtidas pelos ensaios de deslocamentos. A partir destes deslocamentos calcula-se o erro de igual forma ao calculado nos testes de deslocamento.

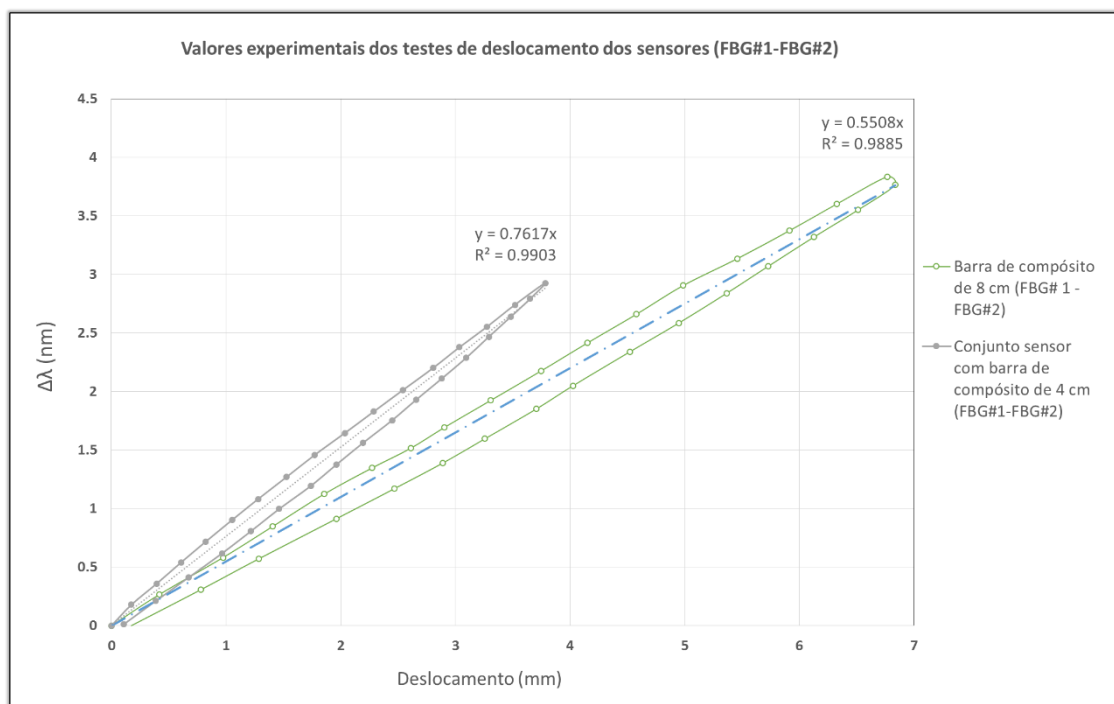


Figura 45- Relação da variação de comprimento de onda (nm) com deslocamentos (mm) – Valores experimentais

Quadro 13- Relação de temperatura (°C)/deslocamentos (mm)

T (°C)	δ (mm)	
	Barra 8 cm	Conjunto sensor - Barra 4 cm
20	0.0000	0.0000
-20	0.0268	0.0298
80	0.0344	0.0093
20	0.0012	0.0343
0	0.0036	0.0210
-20	0.0117	0.0136
0	0.0060	0.0195
20	0.0017	0.0171
40	0.0010	0.0108
60	0.0195	-0.0008
80	0.0258	0.0058
60	0.0169	0.0016
40	0.0065	0.0192
20	0.0014	0.0255

Quadro 14 – Erros provenientes de variações de temperatura para ambas as barras

T (°C)	ERRO (%)	
	Barra 8 cm	Conjunto sensor - Barra 4 cm
20	0.00	0.00
-20	0.74	0.85
80	0.77	0.71
20	0.65	0.89
0	0.66	0.79
-20	0.69	0.74
0	0.67	0.78
20	0.65	0.77
40	0.65	0.72
60	0.72	0.64
80	0.74	0.69
60	0.71	0.66
40	0.67	0.78
20	0.65	0.82

O erro máximo registado é de 0.89% para o sensor (barra de 4 cm) e de 0.77% para a barra de 8 cm.

Nota: Refere-se o facto de que os valores experimentais utilizados para o cálculo do erro da barra de 8 cm, foram obtidos pelo ensaio de deslocamentos sobre o sensor (barra de compósito com assemblagem metálica, enquanto que neste ensaio de temperatura a barra foi testada não estando envolvida pela assemblagem metálica.

Test Conclusion

Conclusion

Neste último ensaio constata-se que o sensor registou uma melhoria no seu comportamento (menor erro) quando sujeito a variações de temperatura:

- O facto de o erro no sensor (assemblagem metálica e barra de 4cm) ter sido cerca de metade do registado no teste anterior justifica-se pelo facto de se ter eliminado as tensões residuais acumuladas que podiam existir que dificultavam a adaptação da assemblagem metálica às temperaturas mais extremas.
- Em ambas as barras testadas o erro obtido foi inferior a 1% o que se considera um valor satisfatório para um sensor de deslocamentos com auto compensação de temperatura.

QMS Document Name	Internal Development Test Report	Doc Ref: itestr/o.1/xx
QMS Document Description	FiberSensing Internal Development Test Report	
Date	File Name	Pages
26 October 2014	Relatório de Testes ShapeSensor	32
Tip: to ensure correct File name right click and select Update Field		

Final Test Conclusion

Conclusion

Como conclusão final de todos os testes efetuados ao sensor conclui-se que:

- O sensor apresenta resultados experimentais não esperados. A sensibilidade do sensor é em grande percentagem inferior ao expectável o que significa que a parte mecânica do sensor não representa estruturalmente o projetado teoricamente.
- Os resultados experimentais referentes aos ensaios de deslocamento demonstram que o sensor apresenta erros provenientes de histerese da barra de compósito. A existência de pequenas folgas nas peças metálicas e um menor rigor na aplicação das cargas durante os ensaios explicam esse facto.
- A partir dos testes de temperatura afirma-se, que de forma geral, o sensor apresenta bons resultados quando sujeito a variações de temperatura verificando-se erros de baixo valor.

O erro do sensor é dado pela soma do maior erro encontrado durante os ensaios de deslocamento com o erro respetivo dos testes de temperatura, assim sendo:

Erro (%) ShapeSensor com barra de compósito de 8 cm = 5.264% (deslocamento) + 0.770% (temperatura) = 6.034%

Erro (%) ShapeSensor com barra de compósito de 4 cm = 4.432% (deslocamento) + 0.890% (temperatura) = 5.322%

Os erros obtidos são demasiado grandes para um sensor de deslocamentos.

Indicações para futuros testes ao sensor:

- Realizar os testes de deslocamento com um maior rigor no controlo dos deslocamentos (utilizar cargas mais controláveis).
- Aproximar os FBG o mais possível do eixo de rotação do sensor.
- Quanto maior for a altura da barra maior sensibilidade terá o sensor para um mesmo deslocamento (ter em atenção que maior alturas da barra implicam um aumento na rigidez do conjunto).
- Quanto menor for o comprimento da barra de compósito maior sensibilidade terá o sensor para um mesmo deslocamento (ter em atenção que menores comprimentos da barra implicam um aumento na rigidez do conjunto).
- Alterar, caso seja benéfico e em última opção, o processo mecânico do sensor.

O protótipo do ShapeSensor necessita de melhorias para ser considerado uma opção válida para ser utilizado para monitorização de convergências em túneis.